



# MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

## APLICACIÓN DEL HIDRÓGENO Y SUS DERIVADOS PARA LA DESCARBONIZACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO ESPAÑOL

Autor: Enrique Conde Rodríguez

Director: Antonio Canoyra Trabado

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
“Aplicación del hidrógeno y sus derivados para la descarbonización del sistema marítimo  
español”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2023/24 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.: Enrique Conde Rodríguez

Fecha: 24/08/2024

Autorizada la entrega del proyecto

**EL DIRECTOR DEL PROYECTO**

Fdo.: Antonio Canoyra Trabado

Fecha: ...../ ...../ .....



# Agradecimientos

A mi abuelo Lorenzo.



# APLICACIÓN DEL HIDRÓGENO Y SUS DERIVADOS PARA LA DESCARBONIZACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO ESPAÑOL

**Autor: Conde Rodríguez, Enrique.**

Director: Canoyra Trabado, Antonio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## RESUMEN DEL PROYECTO

Este trabajo analiza el impacto económico y las alternativas para la descarbonización del transporte marítimo en España, mediante la sustitución de la flota marítima española por barcos propulsados por combustibles renovables, como el hidrógeno verde y sus derivados como metanol y amoníaco, para el año 2052

Utilizando un modelo económico detallado, se evalúan los costes económicos y beneficios de esta transición en términos de reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero.

**Palabras clave:** Hidrógeno verde, metanol, biometanol, amoníaco, PNIEC, Sector marítimo, Emisiones GEI.

### 1. Introducción

El proyecto aborda la creciente necesidad de descarbonizar el sector marítimo español para cumplir con las metas establecidas en el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) [1] y la regulación FuelEU Maritime [2]. La motivación principal es analizar las alternativas de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, promoviendo el uso de energías renovables en el transporte marítimo.



*Ilustración 1. Planta de licuefacción de GNL flotante*

## 2. Definición del proyecto

El objetivo es el desarrollo de un modelo numérico que permita evaluar el coste económico de las diferentes alternativas de descarbonización, sustituyendo el uso de combustibles fósiles por hidrógeno verde, gas natural, metanol y amoníaco en la flota marítima española. Se considera un horizonte temporal de 30 años, analizando diferentes escenarios económicos y regulatorios. Se emplean curvas de abatimiento marginal para determinar el coste por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente reducida, y se obtienen los costes asociados a diferentes supuestos asumidos.

## 3. Descripción del modelo.

Debido a la naturaleza compleja del sector del transporte marítimo, marcadamente internacional y con una actividad y unas emisiones difícil de asociar a la bandera del buque, hace que sea difícil la delimitación de la actividad por países.

En este trabajo se han analizado dos alternativas. La primera nace de la consideración de las emisiones de la flota española aplicando valores medios de actividad. La segunda, por otro lado, nace de asignar las emisiones derivadas del repostaje en puertos españoles. Ninguna es perfecta, puesto que la actividad no se puede ligar directamente ni a la bandera ni al punto de repostaje, pero se ha considerado más aproximada la segunda.

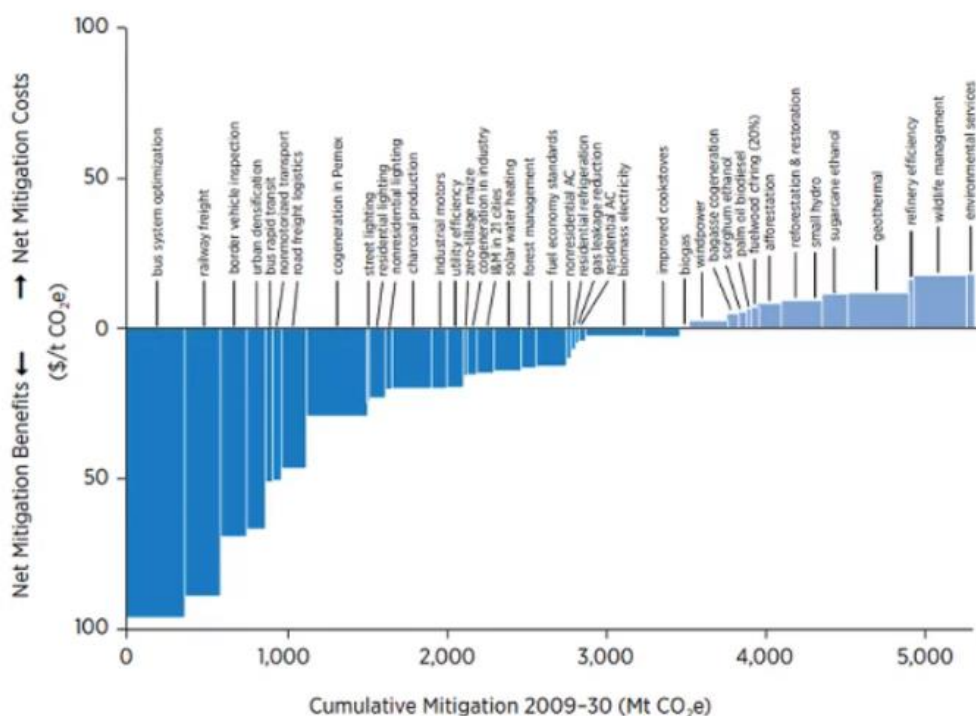


Ilustración 2. Curva de abatimiento (Low-Carbon Development for Mexico ESMAP)

En cualquier caso, y debido a que el modelo económico financiero para el cálculo de las diferentes alternativas se puede aplicar de sobre cualquier flota modelo, su aplicación sobre diversos escenarios de flota es inmediata. Por eso se considera la elaboración del sistema o modelo de análisis de datos el objetivo primordial del trabajo.

Para estimar el alcance del sector marítimo en España, se utiliza un modelo basado en datos de la plataforma THETIS y registros oficiales de puertos españoles [3] [4].

El modelo categoriza la flota en varios tipos de barcos y evalúa la eficiencia energética de cada motor y las emisiones de cada tipo de combustible.

Para la asignación de los costes equivalentes al sector naviero español, se han usado factores de corrección basados en la contribución del repostaje en España a las emisiones totales de cada tipo de barco.

El modelo tiene en cuenta tan solo costes y operativa desde el momento del repostaje, ignorando costes de obtención de los combustibles, su infraestructura y desarrollo de la misma.

Una vez determinada la flota de referencia y la estructura de costes a considerar, se ha diseñado un caso base o escenario *business-as-usual*, que recoge lo que sería la evolución de la flota, considerando la tecnología actual y los combustibles fósiles convencionales, así como hipótesis acerca del crecimiento de actividad y de la evolución de los precios de los combustibles y los derechos de emisión de CO<sub>2</sub>. Sobre el mismo y de manera comparativa, se analizan escenarios alternativos correspondientes a los diferentes combustibles (GNL, hidrógeno verde, metanol y amoniaco), incorporando las inversiones necesarias para cambiar los sistemas de propulsión y evaluando los costes operacionales (OPEX) de combustibles y emisiones.

Finalmente se comparan los costes totales, desglosados en incremento de CAPEX y OPEX y se calculan los costes de abatimiento por tonelada de CO<sub>2</sub> y se extraen las conclusiones.

El modelo estará desarrollado en Microsoft Excel, y será complementado con software de código abierto para el tratamiento de datos adicionales.

#### **4. Resultados**

El análisis muestra que la transición a combustibles renovables muy intensiva en cuanto a costes de capital (CAPEX).

El hidrógeno verde presenta el valor actual neto más alto en cuanto a coste de implantación, pero es el único junto con el biometanol que consigue un escenario donde se pueden reducir el 100% de las emisiones.

El metanol tiene un coste de implantación poco competitivo en relación al resto de tecnologías, mientras que su alternativa, el biometanol, es mucho más viable a nivel reducción de emisiones y costes.



Según los datos extraídos, el amoniaco y el gas natural licuado, hasta ahora considerados como combustibles de transición deberían ser reevaluados considerando estrategias de largo plazo, ya que la reducción que ofrecen frente a sus costes de inversión hace que no sean tan competitivos cuando se calcula el coste de abatimiento durante la larga vida útil de los buques.

## 5. Conclusiones

El estudio demuestra que los combustibles alternativos estudiados ofrecen reducciones significativas de emisiones, entre un 30% y 100%, siendo técnicamente viables y efectivos.

Sin embargo, el elevado CAPEX que exige la renovación de la flota hace que no el incentivo que supone el ahorro de OPEX en términos de pago por emisiones no sea suficiente para impulsar la inversión.

La siguiente Tabla ilustra el estudio comparativo entre las dos flotas observadas, realizado para obtener visibilidad de como afectan las distintas composiciones de flota al esfuerzo inversor necesario.

<i>\$/tCO2 abatida</i>	<i>Flota modelo</i>	<i>Flota española</i>	<i>Variación</i>
LNG	701,00	888,36	+27%
Amoniaco	579,00	822,55	+42%
Biometanol	231,00	424,55	+84%
Hidrógeno	363,00	703,77	+94%

En este sentido, el estudio propone sustituir el metanol convencional por biometanol, por tener este último una mayor competitividad económica.

Las curvas de abatimiento marginal obtenidas considerando la reducción de emisiones a lo largo del periodo de análisis (30 años) indican que el biometanol y el hidrógeno deben ser considerados soluciones definitivas y no transitorias para la descarbonización.

Como ya se ha explicado, el principal obstáculo encontrado para la descarbonización del sector es el elevado CAPEX de renovación de flota, que sigue siendo poco rentable para los operadores, incluso con el apoyo financiero del sistema ETS.

## 6. Referencias

- [1] [M. E. p. I. T. Ecológica, «Borrador 2023 para la actualización del PNIEC 2023-2030,» Gobierno de España, Madrid, 2023.
- [2] Comisión Europea, «REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC,» Comisión Europea, Bruselas, 2021.
- [3] EMSA - European Maritime Safety Agency, «THETIS,» Brussels, 2022.

[4] Puertos del Estado, «Estadísticas mensuales de los puertos del Estado,» [En línea].

Available: [https://www.puertos.es/es-es/estadisticas/Paginas/estadistica\\_mensual.aspx](https://www.puertos.es/es-es/estadisticas/Paginas/estadistica_mensual.aspx).

# APPLICATION OF HYDROGEN AND ITS DERIVATIVES TO THE DECARBONIZATION OF THE SPANISH MARITIME TRANSPORT

**Author: Conde Rodríguez, Enrique.**

Supervisor: Canoyra Trabado, Antonio

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## ABSTRACT

This paper analyses the economic impact and alternatives for the decarbonisation of maritime transport in Spain, through the replacement of the Spanish maritime fleet by ships powered by renewable fuels, such as green hydrogen and its derivatives methanol and ammonia, by 2052.

Using a detailed economic model, the economic costs and benefits of this transition in terms of greenhouse gas emission reductions are assessed.

**Keywords:** Green hydrogen, methanol, ammonia, PNIEC, FuelEU, Maritime sector, GHG emissions

## 1. Introduction

The project addresses the growing need to decarbonise the Spanish maritime sector in order to meet the targets set in the National Integrated Energy and Climate Plan (PNIEC) [1] and the FuelEU Maritime regulation [2]. The main motivation is to analyse alternatives for reducing greenhouse gas emissions by promoting the use of renewable energies in maritime transport.



*Figure 1. Floating LNG plant*

## 2. Project definition

The objective is to develop a numerical model to evaluate the economic cost of different decarbonisation alternatives, replacing the use of fossil fuels with green hydrogen, natural gas, methanol and ammonia in the Spanish maritime fleet. A time horizon of 30 years is considered, analysing different economic and regulatory scenarios. Marginal abatement curves are used to determine the cost per tonne of CO<sub>2</sub> equivalent reduced, and the costs associated with different assumptions are obtained.

## 3. Model description

Due to the complex nature of the maritime transport sector, which is markedly international and whose activity and emissions are difficult to associate with the ship's flag, it is difficult to delimit activity by country.

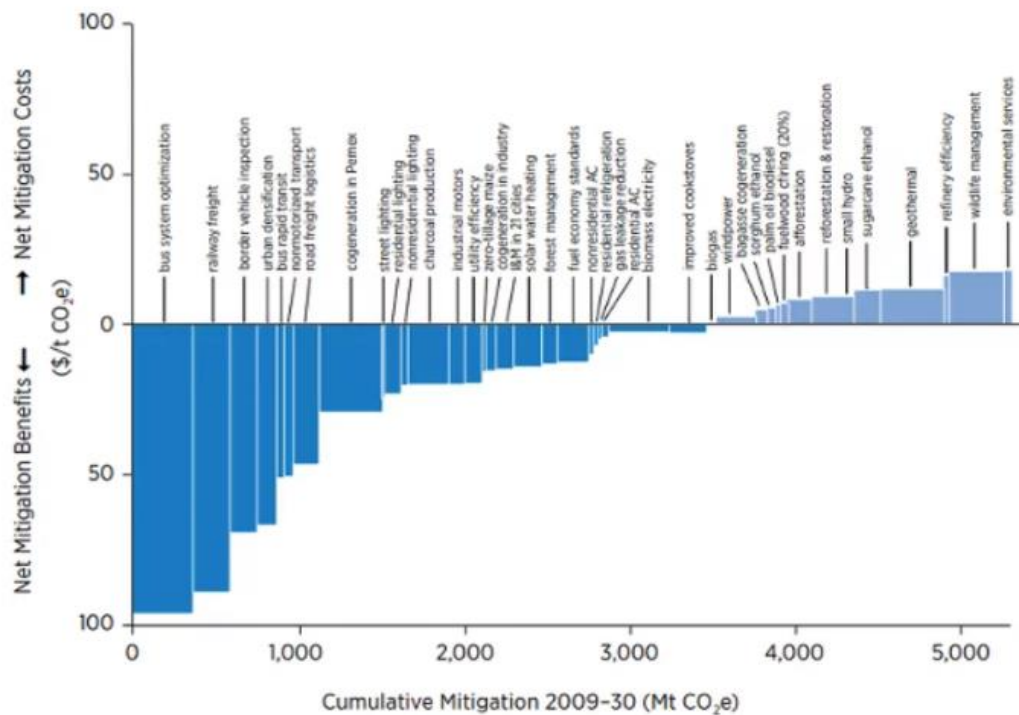


Figure 2. Marginal abatement curve (Low Carbon Development for Mexico ESMAP)

Two alternatives have been analysed in this paper. The first is based on the consideration of the emissions of the Spanish fleet by applying average activity values. The second, on the other hand, is based on assigning the emissions derived from refuelling in Spanish ports. Neither is perfect, since activity cannot be directly linked either to the flag or to the refuelling point, but the second one has been considered more approximate.

In any case, and because the economic-financial model for the calculation of the different alternatives can be applied to any model fleet, its application to different fleet scenarios is immediate. This is why the development of the data analysis system or model is considered the primary objective of the work.

To estimate the scope of the maritime sector in Spain, a model based on data from the THETIS platform and official registers of Spanish ports is used [3].

The model categorises the fleet into several types of ships and assesses the energy efficiency of each engine and the emissions of each fuel type.

For the allocation of equivalent costs to the Spanish shipping sector, correction factors based on the contribution of refuelling in Spain to the total emissions of each ship type have been used.

The model takes into account only costs and operations from the time of refuelling, ignoring fuel procurement costs, infrastructure and infrastructure development.

Once the reference fleet and the cost structure to be considered have been determined, a base case or business-as-usual scenario has been designed, which includes what would be the evolution of the fleet, considering current technology and conventional fossil fuels, as well as hypotheses about the growth of activity and the evolution of fuel prices and CO<sub>2</sub> emission rights. On this basis and in a comparative manner, alternative scenarios are analysed for the different fuels (LNG, green hydrogen, methanol and ammonia), incorporating the investments necessary to change propulsion systems and evaluating the operational costs (OPEX) of fuels and emissions.

Finally, the total costs are compared, broken down into incremental CAPEX and OPEX and the abatement costs per tonne of CO<sub>2</sub> are calculated and conclusions are drawn.

The model will be developed in Microsoft Excel, and will be complemented with open source software for additional data processing.

#### **4. Results**

The analysis shows that the transition to renewable fuels is very capital cost intensive (CAPEX).

Green hydrogen has the highest net present value in terms of deployment cost, but is the only one, together with biomethanol, that achieves a scenario where 100% emission reductions are possible.

Methanol has an implementation cost that is not very competitive in relation to the other technologies, while its alternative, biomethanol, is much more viable in terms of emission and cost reductions.

According to the data extracted, ammonia and liquefied natural gas, so far considered as transition fuels, should be re-evaluated considering long-term strategies, as the reduction they offer compared to their investment costs makes them less competitive when calculating the cost of abatement over the long lifetime of ships.

## 5. Conclusions

The study shows that the alternative fuels studied offer significant emission reductions, between 30% and 100%, and are technically feasible and effective.

However, the high CAPEX required for fleet renewal means that the incentive of OPEX savings in terms of emission payments is not sufficient to drive the investment.

The following table illustrates the comparative study between the two observed fleets, carried out to gain visibility of how the different fleet compositions affect the required investment effort.

	<i>\$/tCO<sub>2</sub> abated</i>	<i>Model fleet</i>	<i>Observed Spanish fleet</i>	<i>+/- (%)</i>
LNG		701,00	888,36	+27%
Ammonia		579,00	822,55	+42%
Biomethanol		231,00	424,55	+84%
Hydrogen		363,00	703,77	+94%

In this sense, the study proposes replacing conventional methanol with biomethanol, as the latter is more economically competitive.

The marginal abatement curves obtained considering the reduction in emissions over the analysis period (30 years) indicate that biomethanol and hydrogen should be considered definitive and not transitory solutions for decarbonisation.

As explained above, the main obstacle encountered for the decarbonisation of the sector is the high CAPEX for fleet renewal, which remains unprofitable for operators, even with the financial support of the ETS.

## 6. References

- [1] [M. E. p. I. T. Ecológica, «Borrador 2023 para la actualización del PNIEC 2023-2030,» Gobierno de España, Madrid, 2023.
- [2] Comisión Europea, «REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC,» Comisión Europea, Bruselas, 2021.
- [3] EMSA - European Maritime Safety Agency, «THETIS,» Brussels, 2022.
- [4] Puertos del Estado, «Estadísticas mensuales de los puertos del Estado,» [En línea]. Available: [https://www.puertos.es/es-es/estadisticas/Paginas/estadistica\\_mensual.aspx](https://www.puertos.es/es-es/estadisticas/Paginas/estadistica_mensual.aspx).







## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>7</b>
1.1 Motivación del proyecto	7
1.1.1 El papel del hidrógeno verde en la descarbonización de la economía	7
1.1.2 PNIEC	8
1.1.3 Objetivos de Desarrollo Sostenible y alineación con los mismos	12
<b>Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías</b>	<b>13</b>
<b>Capítulo 3. Estado de la Cuestión</b>	<b>15</b>
3.1 Contexto	15
3.2 Legislación y regulación	16
3.2.1 Regulación internacional	17
3.2.2 Reglamento FuelEU Maritime	18
3.2.3 Combustibles y financiación	21
<b>Capítulo 4. Definición del Trabajo</b>	<b>25</b>
4.1 Justificación y objetivos	25
4.2 Metodología. Curvas de abatimiento marginal	26
<b>Capítulo 5. Análisis de demanda</b>	<b>28</b>
5.1 Análisis de la plataforma naviera THETIS	29
5.2 Análisis de los puertos españoles y obtención de datos. Categorización de la flota y definición del alcance del sector marítimo español	30
5.2.1 Definición de alcance del estudio	33
5.3 Elaboración de la flota objeto de estudio	34
5.4 Análisis de la eficiencia energética de los motores más comunes según la categorización	37
5.5 Análisis de emisiones. Mecanismo de modelado de la descarbonización	40
5.5.1 Consumo de combustibles por puerto	41
5.5.2 Cálculo de emisiones por puerto y combustible	42
5.5.3 Methane slip	44
5.6 Extracción de conclusiones de cara al modelo de implantación y de Curvas de abatimiento	45
5.7 Cálculo de reducción de emisiones de cada combustible alternativo	46

<b>Capítulo 6. Modelo económico</b> .....	<b>49</b>
6.1 Metodología y condiciones de contorno generales.....	50
6.1.1 Condiciones de contorno del modelo.....	51
6.2 Hipótesis sobre el combustible.....	52
6.2.1 Evolución del precio de los combustibles del mix actual.....	52
6.2.2 Evolución de los combustibles alternativos considerados .....	53
6.3 Hipótesis sobre el CAPEX.....	54
6.3.1 Tasa de renovación de la flota.....	54
6.3.2 Metodología de renovación de la flota .....	56
6.4 Hipótesis sobre el caso base.....	57
<b>Capítulo 7. Resultados. Análisis de Sensibilidad</b> .....	<b>60</b>
7.1 Escenario actual.....	60
7.2 Análisis de escenario actual .....	63
7.3 Análisis de sensibilidad frente a tasa de emisiones .....	67
7.3.1 Escenario sin tasa de emisiones .....	67
7.3.2 Escenario de tasa de emisiones agresiva.....	69
7.3.3 Adelantamiento del perfil de tasas de emisiones 10 años .....	70
7.3.4 Comparativa de impacto de tasa de emisiones frente a CAPEX.....	71
7.4 Análisis de sensibilidad frente a precios de combustibles .....	72
7.4.1 Análisis de sensibilidad frente al precio de los combustibles alternativos .....	75
7.4.2 Análisis de sensibilidad frente a precios de combustibles fósiles actuales .....	76
7.4.3 Observaciones .....	77
7.5 Análisis de sensibilidad frente a tasa de renovación y comparativa OPEX-CAPEX.....	78
7.5.1 Análisis de sensibilidad. Escenario actual sin tasa de renovación.....	79
7.5.2 Análisis unitario por barco del escenario actual inicial. Comparativa inversión en renovación vs. Costes operativos .....	81
7.6 Comparativa de flota modelo vs. flota española .....	82
<b>Capítulo 8. Conclusiones y Trabajos Futuros</b> .....	<b>85</b>
<b>Capítulo 9. Bibliografía</b> .....	<b>88</b>
<b>ANEXO I</b>	<b>92</b>

## *Índice de figuras*

Figura 1. Evolución del tamaño de flota desglosado por tipo de barcos .....	58
Figura 2. Evolución del coste de emisiones en \$/tCO <sub>2</sub> (www.enerdata.net).....	59
Figura 3. Costes de abatimiento por combustible frente a poder descarbonizador. Escenario actual .....	62
Figura 4. Curva de abatimiento marginal. Escenario actual .....	62
Figura 5. Costes de abatimiento por combustible revisados. Escenario actual .....	65
Figura 6. Curvas de abatimiento marginal revisadas. Escenario actual.....	66
Figura 7. Coste por tonelada abatida del escenario sin tasa de emisiones vs. escenario actual .....	68
Figura 8. Curvas de abatimiento marginal del escenario sin tasa de emisiones.....	68
Figura 9. Perfil de precios de emisiones utilizado.....	70
Figura 10. Análisis de sensibilidad por tonelada frente a precios de combustibles alternativos .....	75
Figura 11. Disminución del CAPEX necesario sobre el escenario as-is al eliminar la tasa de renovación .....	79
Figura 12. Reducción en el precio por tonelada al eliminar la tasa de renovación frente al caso base.....	80

## *Índice de tablas*

Tabla 1. Objetivos del PNIEC .....	10
Tabla 2. Comparativa del PCI y el rendimiento térmico de los motores de los distintos combustibles alternativos. ....	24
Tabla 3. Recuento de distintas categorías de barco según THETIS .....	30
Tabla 4. Relevancia de los puertos estudiados con respecto al total de los puertos españoles en el año 2022.....	31
Tabla 5. Categorización de los tipos de barco para el modelo. ....	32
Tabla 6. Número de barcos observados para el modelo .....	33
Tabla 7. Regiones marítimas españolas .....	36
Tabla 8. Desglose de número de barcos que repostaron en España en 2022, desglosados por tipo de combustible y puerto .....	36
Tabla 9. Motores utilizados por las distintas categorías de barco y sus eficiencias para cada tipo de combustible.....	38
Tabla 10. Poderes caloríficos de los combustibles convencionales analizados (Precios según Repsol, <a href="http://www.bunkeroil.com">www.bunkeroil.com</a> y el fabricante de motores Wartsila).....	40
Tabla 11. Necesidades energéticas de la flota. Resumen.....	40
Tabla 12. Toneladas consumidas de cada tipo de combustible por puerto .....	42
Tabla 13, Necesidades energéticas por puerto y combustible (MJt) .....	42
Tabla 14. Coeficientes de emisión y conversión a tCO <sub>2</sub> equivalente por combustible [21].....	43
Tabla 15. Toneladas de agentes contaminantes por puerto y combustible .....	43
Tabla 16. Toneladas equivalentes de dióxido de carbono por puerto y combustible emisor .....	43
Tabla 17. Toneladas equivalentes por puerto ajustadas para el methane slip del GNL.....	45
Tabla 18. Factores de corrección a la hora de calcular el esfuerzo inversor relativo a la flota de referencia .....	46

Tabla 19. Parámetros de eficiencia de los combustibles alternativos. (Reglamento FueIEU)	47
Tabla 20. Reducción inmediata frente a situación actual de la flota	48
Tabla 21. Precios considerados para los combustibles del mix del caso base para el año 2022 (www.shipandbunker.com)	52
Tabla 22. Precios observados de combustibles alternativos de 2022-2024	54
Tabla 23. Tasas de renovación de los distintos tipos de barco	55
Tabla 24. Costes de inversión en nuevos barcos	57
Tabla 25. Resultados económicos globales de los distintos escenarios (VAN)	60
Tabla 26. Porcentaje aplicable a la flota de referencia según emisiones generadas.	60
Tabla 27. Resultados de rentabilidad descarbonizadora de inversión del escenario actual	61
Tabla 28. Comparativa de precios observados de metanol vs. biometanol (www.enerdata.net)	64
Tabla 29. Reducción de las distintas alternativas considerando el biometanol, desglosadas por tipo de barco.	64
Tabla 30. Rentabilidad descarbonizadora revisada. Escenario actual	65
Tabla 31. Rentabilidad descarbonizadora revisada. Escenario sin tasas de emisiones	67
Tabla 32. Resultados de rentabilidad descarbonizadora bajo un escenario de tasa de emisiones agresivo	69
Tabla 33. Resultados de rentabilidad descarbonizadora bajo condiciones de adelantamiento del perfil económico de tasas por emisiones	71
Tabla 34. Cifras económicas significativas	72
Tabla 35. Tasas anualizadas de crecimiento de precio de combustibles bajo el escenario inicial de análisis de sensibilidad del modelo al precio del combustible	73
Tabla 36. Escenario inicial de análisis de sensibilidad al precio del combustible	74
Tabla 37. Sensibilidad porcentual frente a variaciones del precio de los combustibles	75
Tabla 38. Análisis de rendimiento de las alternativas frente a cambios de precio de combustible en el caso base.	76
Tabla 39. CAPEX debido a la tasa de renovación	79
Tabla 40. Rentabilidad del abatimiento sin tasa de renovación	80

Tabla 41. Resultados en VAN de la inversión y comparativa OPEX/CAPEX.....	81
Tabla 42. Flota modelo vs. flota de bandera española.....	82
Tabla 43. Comparativa de emisiones entre flota modelo y flota de bandera española.....	83
Tabla 44. Comparativa de precios por tonelada abatida .....	84
Tabla 45. Comparativa de OPEX y CAPEX.....	84

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

### ***1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO***

La primera utilización del gas hidrógeno como elemento generador de electricidad data de 1838, cuando, aprovechando el descubrimiento de la electrólisis, se desarrolla la primera batería de hidrógeno. Desde entonces, varios han sido los impulsos y avances sufridos por esta tecnología, especialmente en el marco de la propulsión de vehículos, como la creación del primer coche propulsado por hidrógeno de la mano de la marca Toyota en 2016. Tradicionalmente, este hidrógeno se ha obtenido a partir de combustibles fósiles, aunque actualmente existe la alternativa del hidrógeno verde, producido mediante hidrólisis, sobre el cual se centrará este proyecto.

Ante la creciente conciencia global acerca del cambio climático, el creciente esfuerzo inversor en energías renovables y los esfuerzos legislativos de los gobiernos hacia un mundo más ecológico, el uso del hidrógeno como vector energético suscita cada vez más interés en el mundo de la ingeniería energética. En la actualidad, ingenieros de todo el mundo estudian la viabilidad de la sustitución de tecnologías basadas en la combustión de combustibles no renovables, por otras fuentes de energía sin emisiones, eficientes y escalables. No solo se busca obtener nuevas fuentes de energías sin coste medioambiental, sino también seguir desarrollando los medios de obtención de tecnologías y vectores energéticos ya existentes, como el hidrógeno, mediante medios no contaminantes.

#### **1.1.1 EL PAPEL DEL HIDRÓGENO VERDE EN LA DESCARBONIZACIÓN DE LA ECONOMÍA**

El hecho de que las únicas materias primas necesarias para la producción del hidrógeno verde sean el agua y la electricidad, lo convierte en una alternativa renovable, a diferencia de los combustibles fósiles que utilizan otros procesos de producción de hidrógeno.

A pesar de que, de momento, sus características y proceso productivo no permiten que el hidrógeno pueda ser uno de los principales combustibles para la producción energética, el hecho de ser una tecnología que permite la transformación o almacenamiento de energía excedente en energía almacenable dotan al hidrógeno de una importancia crucial en el proceso de descarbonización de la economía.

Los combustibles obtenidos a partir del hidrógeno verde son principalmente el metanol y el amoníaco verdes, además de otros combustibles sintéticos. Para que sean considerados combustibles renovables, no solo han de utilizar hidrógeno verde en su producción, sino que, además, deberán utilizar energías renovables durante su síntesis. Además, el hidrógeno verde puede ser mezclado con el gas natural para disminuir las emisiones específicas del mismo. Estos factores contribuyen a que el hidrógeno sea la manera más útil de descarbonizar procesos donde la energía renovable no es todavía directamente aplicable, como procesos siderúrgicos que necesitan de altas temperaturas.

### **1.1.2 PNIEC**

El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 es un documento del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto demográfico que recoge las bases de la estrategia del gobierno de España para cumplir los compromisos de descarbonización de la economía, entre los que se encuentran [1]:

- *55% de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) respecto a 1990 para el conjunto de la UE.*
- *42,5% de renovables sobre el consumo total de energía final bruta, con un complemento indicativo adicional del 2,5% que permitiría alcanzar el 45%.*
- *38-40,5% de mejora de la eficiencia energética en energía final y energía primaria, respectivamente, con respecto al escenario de referencia 2007.”*



Entre todos los ámbitos en él tratados, el papel del hidrógeno en la descarbonización se recoge en la *Hoja de Ruta del Hidrógeno* [2], donde se determinan, entre otras cosas las líneas de acción y las previsiones para 2030 y 2050 para la tecnología en nuestro país.

Este proyecto pretende ahondar en dicho plan, centrándose en el ámbito de la descarbonización del transporte marítimo español. El proyecto pretende determinar el esfuerzo económico y el potencial de descarbonización que supondría la sustitución de los actuales combustibles por hidrógeno, obtenido mediante diferentes procesos.

La comprensión del PNIEC, su motivación y sus ambiciosos objetivos son la motivación de este trabajo. Sin una estrategia eficiente que cumpla con los objetivos a nivel europeo, en un sector tan importante como el marítimo, será imposible cumplir adecuadamente con la Hoja de Ruta del Hidrógeno. El siguiente trabajo nace pues de la necesidad de evaluar diferentes estrategias para cumplir con lo establecido en los diferentes mecanismos regulatorios en el sector a nivel nacional y europeo. Los objetivos principales del PNIEC son observables en la Tabla 1.

Tabla 1. Objetivos del PNIEC

<i>Dimensión</i>	<i>Objetivo Principal</i>
Descarbonización	1. Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 23% respecto a 1990 para el año 2030.  2. Alcanzar un 42% de energía renovable sobre el uso final de la energía para 2030.  3. Lograr que el 74% de la generación eléctrica provenga de fuentes renovables en 2030.
Eficiencia Energética	4. Mejorar la eficiencia energética en un 39,5% para el año 2030.
Seguridad Energética	5. Reducir la dependencia energética del exterior del 74% en 2017 al 61% en 2030.
Mercado Interior de Energía	6. Alcanzar un 15% de interconexión eléctrica entre los Estados miembros de la UE para 2030.
I+D+i y Competitividad	7. Aumentar la inversión en investigación, innovación y competitividad en tecnologías energéticas bajas en carbono y limpias.

El desarrollo de nuevas tecnologías para la obtención de energía de una manera limpia y renovable resulta esencial para la evolución hacia un futuro sostenible. Numerosos países están dirigiendo sus esfuerzos hacia la investigación e implantación de estas tecnologías en vías de desarrollo. Es por ello que la descarbonización de los procesos energéticos supone uno de los desafíos actuales más importantes en el mundo de la ingeniería.

Sin embargo, se trata de un proceso complejo, ya que necesita incorporar criterios técnicos, logísticos, económicos y legislativos. Por este motivo, muchos sectores del tejido industrial

y logístico mundial comienzan a poner el foco en el impacto económico de la transición y la necesidad de llevarla a cabo de forma ordenada.

Este trabajo pretende profundizar en dicho análisis, incluyendo en su ámbito de investigación parámetros ajenos a la parte técnica. Con la ayuda del Instituto de Investigación Tecnológica de ICAI, pretende analizar en detalle el proceso de descarbonización de una industria intensiva en el uso de energía como es el transporte marítimo a través del uso de hidrógeno.

Así mismo, se pretende utilizar el sector marítimo español como modelo para evaluar las pretensiones descritas en la Hoja de Ruta del Hidrógeno, establecida por el gobierno español dentro del marco del PNIEC [2], así como su encaje dentro de la regulación europea actual y prevista en el reglamento FuelEU Maritime.

En caso de considerarse oportuno, se profundizará también en iniciativas para la descarbonización del consumo energético de las actividades portuarias. En tal caso, se tomarán ejemplos ya existentes, como la iniciativa “*Clean Ports*” del puerto de Valencia, así como posibles estrategias a tomar en un futuro.

El proyecto pretende principalmente evaluar económicamente el coste y la rentabilidad de la sustitución, así como su alcance potencial, considerando diferentes variables como:

- Metodología de implantación del hidrógeno
- Procesos de obtención del hidrógeno y combustibles verdes derivados
- Variabilidad de la demanda
- Escenarios económicos
- Posibles efectos regulatorios europeos

### **1.1.3 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE Y ALINEACIÓN CON LOS MISMOS**

El desarrollo del proyecto pretende cumplir con los siguientes ODS [3]:

- **7. Energía asequible y no contaminante**

El principal objetivo con el que pretende cumplir este trabajo es con el desarrollo de energía asequible y no contaminante. Si bien es verdad que el uso del hidrógeno verde ya es de por sí no contaminante, la determinación del modelo de producción más viable sigue muy abierta a debate. El proyecto pretende evaluar y relacionar la contaminación producida por los distintos métodos de producción del hidrógeno con su coste y viabilidad económica, para intentar encontrar el equilibrio óptimo.

- **9. Industria, innovación e infraestructura**

El ámbito energético es uno de los campos de la ingeniería que, hoy en día, más esfuerzos de innovación concentra. Al evaluar la viabilidad de la implantación de infraestructuras especializadas, contribuimos a la creación de una red sólida y sostenible para respaldar nuevas formas de energía. El hecho de buscar la implantación de dichas innovaciones en un ámbito tan crítico para el funcionamiento del comercio como es el sector del transporte marítimo hace que este proyecto se alinee de manera casi perfecta con el ODS número 9 de la ONU.

- **13. Acción por el clima**

Al abrazar el potencial del hidrógeno como una alternativa de combustible limpia y sostenible, este proyecto busca abordar de manera efectiva las preocupaciones globales sobre el cambio climático. Al reducir significativamente las emisiones de efecto invernadero del transporte marítimo, este proyecto contribuye directamente a los esfuerzos para la mitigación del cambio climático. Al impulsar la adopción de tecnologías energéticas limpias, el proyecto promueve la acción climática, evaluando la viabilidad de un futuro más sostenible, alineándose plenamente con los objetivos de la ONU en la lucha contra el cambio climático.

## **Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS**

Para llevar a cabo el proyecto de investigación serán imprescindibles tanto la modelización del sector a estudiar como las herramientas para construirlo:

Como fuente de datos y documentación se utilizará la aportada por el la Cátedra de Estudios sobre el Hidrógeno del Instituto de Investigación Tecnológica de ICAI, además de informes relevantes de fuentes fiables en la materia, como por ejemplo los detallados en la bibliografía de este trabajo Se pretenderá buscar en todo momento la coherencia de los datos aportados y escenarios modelados con la regulación existente y su evolución prevista, así como con la regulación europea actual y programada pertinente, y se contrastarán los datos obtenidos con distintas organizaciones relevantes.

Como herramientas, para la construcción de los modelos propuestos se utilizará principalmente una herramienta de software informático para procesamiento de datos, cálculos y generación de escenarios, como puede ser Microsoft Excel.

De necesitarse algún tipo de software para el tratamiento de los datos, o para la obtención de información adicional que se encuentre necesaria para la consecución del trabajo, se utilizará en todo momento software de código abierto o software disponible en la Escuela.

Adicionalmente, de verse factible, se podrá recomendar el uso de aplicaciones comerciales específicas, en función del desarrollo del proyecto.

**Requisitos de hardware:** como equipos informáticos para ejecutar los programas necesarios se utilizarán:

- Ordenador personal: HP Pavilion Laptop 14. Procesador i7, RAM de 8Gb.



## **Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN**

### **3.1 CONTEXTO**

El transporte marítimo, como parte integral del sistema global de comercio, desempeña un papel significativo en las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. En el contexto de los esfuerzos internacionales para reducir estas emisiones, el Acuerdo de París de 2015 resulta un hito crucial para la coordinación de objetivos internacionales en el ámbito energético. Según datos de la Agencia Internacional de Energía [4], el transporte marítimo contribuye aproximadamente con el 2-3% de las emisiones globales de dióxido de carbono, y al 1% en el ámbito nacional [5]. Aunque esta cifra puede parecer modesta en comparación con otros sectores, su impacto es significativo, dado que se trata de un área de la aplicación de los motores de combustión de difícil sustitución. Debido a su eficacia para transportar grandes volúmenes de mercancías a largas distancias, el transporte y comercio marítimo representan un 80% del comercio global en volumen [5].

En el caso específico de España, las emisiones del sector del transporte marítimo también son relevantes. Según estadísticas del Instituto Nacional de Estadística, en España, el transporte es responsable de alrededor del 25% de las emisiones totales de GEI, y dentro de este porcentaje, el transporte marítimo juega un papel destacado. A nivel mundial, el transporte marítimo representa aproximadamente el 15% de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y el 13% de las emisiones de óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) [6], que son gases con más potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés). Esta contribución no puede pasarse por alto, especialmente considerando la escala masiva del comercio internacional y la dependencia del transporte marítimo para su facilitación.

La relevancia del transporte marítimo en relación con las emisiones mundiales se hace evidente al compararla con otros sectores, como el transporte terrestre y la industria. Aunque el transporte terrestre, incluyendo automóviles, camiones y trenes, es conocido por sus altas emisiones, el transporte marítimo es a menudo menos visible pero igualmente significativo.

Su papel en el comercio global y su eficiencia para transportar grandes cantidades de carga a largas distancias hacen que sea un componente fundamental del sistema económico mundial. Sin embargo, esta misma eficiencia, unida a la ausencia de alternativas extendidas, implica el uso extensivo de combustibles fósiles, lo que contribuye a sus emisiones considerables.

La complejidad de abordar el transporte marítimo en el contexto de la descarbonización radica en varios factores. Primero, existe una falta de alternativas viables a los combustibles fósiles para la propulsión de buques a gran escala. La naturaleza internacional y fragmentada de la industria marítima dificulta la implementación de regulaciones uniformes y efectivas a nivel global. Las decisiones regulatorias requieren la cooperación de múltiples partes interesadas, incluyendo gobiernos, empresas navieras, puertos y organismos reguladores internacionales.

Por último, existe una resistencia al cambio dentro del sector marítimo, impulsada por la necesidad de mantener la rentabilidad y la competitividad en un mercado global altamente competitivo. La inversión en nuevas tecnologías y la adaptación a regulaciones más estrictas pueden implicar costes significativos y riesgos financieros para las empresas navieras. En resumen, la relevancia del transporte marítimo en las emisiones globales y la complejidad asociada con su abordaje resaltan la necesidad de enfoques integrados y colaborativos para enfrentar los desafíos de la descarbonización en este sector específico.

### **3.2 LEGISLACIÓN Y REGULACIÓN**

En 2018, la Organización Marítima Internacional (OMI) adoptó su Estrategia Inicial sobre la Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de los Buques (OMI, 2018). Esta estrategia inicial contiene, entre otros aspectos, una visión para eliminar gradualmente las emisiones de GEI de los buques; niveles de ambición para la intensidad de carbono del transporte marítimo, así como para la reducción de emisiones; una lista de medidas candidatas; y una sección sobre los impactos en los Estados.



La Estrategia Inicial contiene la ambición de reducir las emisiones de GEI del transporte marítimo en al menos un 50% para 2050, en relación con los niveles de 2008, "como un punto en un camino de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> coherente con los objetivos de temperatura del Acuerdo de París" según la Organización Marítima Internacional (OMI) [7].

En julio de 2023, se adopta por parte de la OMI una Estrategia Revisada. Uno de los principales temas pendientes de acuerdo son los niveles de ambición en cuanto a las emisiones absolutas de GEI del transporte marítimo, no solo para 2050 sino también para 2030 y 2040. Ya en este documento se incluyen nociones de intentar descarbonizar todo el sector para el 2050. Para 2030, las delegaciones se pretenden reducciones de emisiones que van desde el 29% hasta el 50% en relación con los niveles de 2008, y para 2040 del 50% al 96%. [8]

### **3.2.1 REGULACIÓN INTERNACIONAL**

A la hora de hablar de mitigación de impacto de las emisiones de gases de efecto invernadero y combatir el cambio climático, existen varios protocolos y acuerdos por los cuales los países desarrollados se comprometen a un esfuerzo conjunto. El Protocolo de Kioto de 1997, fue el primer acuerdo que establece objetivos vinculantes de reducción de emisiones para los países desarrollados. Posteriormente, el Acuerdo de París de 2015 fue el primero en especificar los objetivos de limitación del calentamiento global al que se comprometía el mundo desarrollado a llegar, promoviendo esfuerzos para limitarlos a 1,5 grados sobre niveles preindustriales. Otros acuerdos como el Pacto Climático de Glasgow en 2021, profundizan en particularidades medioambientales, incluyendo, por ejemplo, la reducción de emisiones de metano y la eliminación gradual del uso de carbón.

Como parte de sus esfuerzos para combatir el cambio climático, la UE ha implementado un sistema integral para gravar las emisiones de CO<sub>2</sub>, el Sistema de Comercio de Emisiones de la UE (ETS, por sus siglas en inglés). Fue implementado en 2005, y desde entonces es el principal mecanismo utilizado para monitorizar y desincentivar las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente. Este sistema opera bajo un esquema de "cap and trade", donde se establece un límite máximo (cap) para las emisiones totales permitidas y se permite la compra y venta

(trade) de permisos de emisión dentro de ese límite. Las empresas que emiten CO<sub>2</sub> deben tener permisos para cubrir sus emisiones, y el límite de emisiones se reduce anualmente para disminuir gradualmente las emisiones totales. Este enfoque crea un incentivo económico para reducir las emisiones, ya que las empresas pueden beneficiarse de vender permisos no utilizados. El ETS nace a raíz de la Directiva 2003/87/CE, que, junto con sus posteriores modificaciones (Directiva 2009/29/CE, Decisión UE 2015/1814, Directiva UE 2018/410, Directivas UE 2023/958 y 2023/95) ha resultado ser de las principales herramientas de la Unión en cuanto a políticas medioambientales.

La literatura habla de tres factores que hacen de la descarbonización de este sector una tarea compleja. Primero, al ser un sector con inversiones con una vida útil prolongada, se tiene un ciclo de renovación lento y un coste de renovación elevado [9]. Por otro lado, la infraestructura portuaria y de suministro de combustibles alternativos, como el hidrógeno o el amoníaco, está aún en desarrollo, haciendo al sector dependiente de otros. Por último, es un sector difícil de homogeneizar en cuanto a análisis de datos. Debido al gran número de agentes involucrados, la labor de aunar esfuerzos y métodos de registro de las emisiones se ve afectada por los intereses de muchos países. Además, las normativas internacionales y la competencia global hacen difícil la implementación uniforme de estándares ambientales más estrictos [10]. Como se analizará más adelante en este trabajo, la inclusión de estos tres factores en los modelos de análisis es fundamental para llegar a resultados congruentes.

Se trata de un sector que desde el inicio de las regulaciones medioambientales ha resultado afectado por la legislación europea, desde los esfuerzos generalistas de finales del siglo pasado a la Directiva ETS y sus posteriores modificaciones en la actualidad. En este contexto, el reglamento FuelEU Maritime surge como una extensión natural de estos esfuerzos, enfocándose en reducir las emisiones del sector marítimo, un paso crítico para alcanzar los objetivos de neutralidad climática de la UE.

### **3.2.2 REGLAMENTO FUELEU MARITIME**

El reglamento FuelEU Maritime [11] nace de la Directiva UE 2023/1805 y es considerado una pieza central en los esfuerzos para reducir las emisiones del sector marítimo. Este

reglamento se enmarca dentro del Pacto Verde Europeo y el paquete legislativo Fit for 55, con el objetivo de alcanzar la neutralidad climática para 2050 y reducir las emisiones en un 55% para 2030 respecto a los niveles de 1990 [12]. El objeto del reglamento FuelEU Maritime es establecer reglas uniformes para reducir la intensidad de los gases de efecto invernadero (GEI) de los combustibles utilizados por los buques que realicen actividades comerciales en puertos de la UE. Este reglamento se aplica a todos los buques de arqueo bruto superior a 5,000 GT (*gross tonnage*, en inglés), independientemente de su pabellón, que hagan escala en puertos de la UE, con el objetivo de promover la adopción de combustibles alternativos y tecnologías más limpias en el sector marítimo.

Las principales medidas del reglamento incluyen:

- La introducción de requisitos progresivos para reducir la intensidad de GEI de los combustibles marítimos, comenzando con una reducción del 2% en 2025 y aumentando gradualmente hasta alcanzar una reducción del 75% en 2050.
- Establecimiento un sistema de seguimiento, notificación y verificación (MRV) de las emisiones y el consumo de los buques, que será gestionado por la Agencia Europea de Seguridad Marítima (EMSA).
- Restricciones específicas de acceso a determinadas aguas de la UE.
- Introducción de cambios significativos respecto a la legislación preexistente:
  - Antes de su inclusión, las medidas europeas para reducir las emisiones del sector marítimo eran menos específicas al centrarse principalmente en la inclusión del sector marítimo en el Sistema de Comercio de Emisiones (ETS) y en la Directiva sobre el contenido de azufre en los combustibles marítimos (Directiva 2012/33/UE).
  - El nuevo reglamento establece objetivos claros y específicos para la reducción de la intensidad de GEI, crea un marco regulatorio uniforme y obligatorio para todos los buques en puertos europeos, y enfatiza el uso de tecnologías limpias y combustibles sostenibles de manera mucho más directa.

El reglamento no establece límites de emisiones por buque de manera directa, sino que se enfoca en la intensidad de GEI de los combustibles utilizados. A partir de 2025, los buques deberán reducir la intensidad de GEI de sus combustibles en un 2%, con incrementos progresivos hasta alcanzar una **reducción del 75% en 2050**. Esto se calcula en términos de emisiones por unidad de energía del combustible utilizado. Esta reducción no es por tonelada

transportada sino basada en el contenido energético del combustible, con lo que se empuja directamente a las compañías a utilizar motores y combustibles cada vez más limpios.

Estos objetivos serán implementados mediante el sistema de seguimiento MRV, por el que cada buque deberá reportar su consumo de combustible y sus emisiones de GEI anualmente. Estos datos serán, a su vez, verificados por entidades independientes, de manera que los buques de todo el mundo que entren en aguas europeas y que no cumplan con los requisitos de reducción de intensidad de GEI enfrentarán penalizaciones económicas. Los fondos recaudados serán destinados al llamado Fondo de Innovación de la UE, de manera que, además de actuar como agentes disuasorios, las nuevas tasas introducidas por el FuelEU Maritime financiarán de manera directa la investigación relacionada con combustibles sostenibles. Uno de los principales retos a los que se enfrentará el FuelEU será asegurarse de la solidez de sus sistemas de monitorización de datos de emisiones, así como de su correcta implementación.

De manera similar a lo que ya están implementando algunas ciudades con el tráfico terrestre, el reglamento permite que los puertos europeos pueden establecer zonas de bajas emisiones donde solo se permitirá la entrada de buques que cumplan con ciertos estándares ambientales. Asimismo, el reglamento pretende fomentar la electrificación en puertos, de manera que los buques deban conectarse a la red eléctrica del puerto para reducir el uso de motores auxiliares durante las operaciones de carga y descarga.

Sin embargo, con su entrada en vigor en enero de 2025, el reglamento FuelEU Maritime se enfrentará a varias dificultades. En primer lugar, la disponibilidad y el coste de los combustibles alternativos y sostenibles sigue siendo un desafío. Según el observatorio del centro Maersk Mc-Kinney Moller, *“El coste del cumplimiento del mandato de intensidad de emisiones de FuelEU es muy sensible a la disponibilidad incierta de biocombustibles”* [13] Esta afirmación se debe a la consideración que hace el reglamento FuelEU sobre los biocombustibles. El reglamento considera como biocombustible todo aquel que encaje en la definición del artículo 2, punto 33 de la Directiva EU 2018/2001, por el cual “un biocombustible es todo aquel combustible líquido o gaseoso formado a partir de biomasa”.

Por ello, el reglamento considera que dicha biomasa ha capturado en el momento de su procesamiento el CO<sub>2</sub> equivalente al que emitirá en el momento de su combustión, y le asigna una tasa de emisiones de 0. Esta conclusión tomará especial relevancia en un análisis de la fuente más óptima de combustibles considerados como renovables.

En general, pese a llevar varios años en senda de desarrollo y estar fomentándose su implementación, estos combustibles, como el hidrógeno, el amoníaco y los biocombustibles, presentan todavía dificultades de infraestructura y disponibilidad muy importantes.

### **3.2.3 COMBUSTIBLES Y FINANCIACIÓN**

Según el marco impuesto a partir del 2025 por el reglamento FuelEU, la exploración de nuevos combustibles debe ser un componente crucial en la estrategia de la Unión Europea. Aparte de las ventajas teóricas que ofrece, tales como la reducción significativa de emisiones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes atmosféricos y una menor dependencia de combustibles fósiles, la transición energética hacia combustibles alternativos debe suponer una mejora en la eficiencia de los sistemas de transporte. Además, al diversificar la matriz energética disponible una vez conseguida la eficiencia económica de estos combustibles, se reduciría en gran medida el riesgo de sobreexposición a los derivados del petróleo por parte de la economía mundial.

La UE ha destinado fondos considerables para apoyar la investigación, desarrollo e implementación de nuevos combustibles. Además de Horizonte Europa, marco de investigación desarrollado por la Unión durante los años 2021-2027, la UE ha establecido el Fondo de Innovación con vistas a la aplicación del FuelEU Maritime. Se trata de uno de los programas de financiación más grandes del mundo para la demostración de tecnologías innovadoras de baja emisión de carbono [14] al estar dotado con aproximadamente 10 mil millones de euros para el período 2020-2030.

Como ya se ha mencionado, el reglamento FuelEU responde al esfuerzo de la UE para dirigir la investigación hacia combustibles más eficientes, no solo para reducir emisiones. En lo que al sector marítimo se refiere, son los combustibles verdes en vías de desarrollo los que, a

priori, parecen soluciones más coherentes para el reto planteado. Entre los principales combustibles alternativos más prometedores se encuentran aquellos a analizar en este trabajo, como el hidrógeno, el amoníaco y el metanol, y las soluciones intermedias, como el gas natural licuado y el gas de petróleo licuado (GNL y GPL, respectivamente).

Actualmente, son los combustibles tradicionales como MGO y HFO los más ampliamente utilizados debido a su disponibilidad, infraestructura establecida y costes relativamente bajos [15]. En el ámbito técnico, estos combustibles han sido hegemónicos durante las últimas décadas, por lo que los motores diésel marinos están optimizados para su uso. Sin embargo, sus altas emisiones de CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y partículas representan un desafío ambiental significativo, hecho que les hace tener los días contados tras la aprobación del reglamento FuelEU. Al comenzar ahora una nueva etapa en Europa donde serán gravadas de una manera más activa las emisiones, estos combustibles pronto se encontrarán con un aumento de costes efectivos y, por tanto, una reducción de su competitividad.

Desde el punto de vista técnico, el hidrógeno es atractivo por ser el único con capacidad real de producir energía sin emisiones directas de CO<sub>2</sub> en su utilización o generación. Sin embargo, la producción de este hidrógeno verde requiere una infraestructura significativa para el almacenamiento y la distribución segura debido a su baja densidad energética y la necesidad de compresión o licuefacción. Económicamente hablando, el CAPEX inicial es alto, y la falta de infraestructura madura incrementa los costes operativos.

El amoníaco, similar al hidrógeno, no emite CO<sub>2</sub> durante su combustión y puede ser producido de manera sostenible a partir de hidrógeno verde y nitrógeno, sin emisiones [16]. Al ser su densidad energética mayor que la del hidrógeno, resulta una opción más viable para el almacenamiento y transporte. Sin embargo, el amoníaco también requiere inversiones iniciales altas en infraestructura y tecnología, aunque su producción puede ser menos costosa que la del hidrógeno si se desarrollan rutas de producción eficientes.

El GNL es considerada una opción de transición con ventajas técnicas, así como una reducción significativa de emisiones de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y partículas en comparación con el MGO y el HFO [17]. También ofrece mejoras en la eficiencia del motor y menores emisiones de

CO<sub>2</sub> por unidad de energía. Sin embargo, ambos siguen siendo combustibles fósiles y, aunque más limpios, siguen sin ser soluciones definitivas. Por ello y por su competitividad económica, se consideran ambas alternativas como vías de transición mientras se consigue desarrollar la infraestructura necesaria para la viabilidad del resto de alternativas. La principal desventaja de estos combustibles en cuanto a poder de descarbonización es el *methane slip*.

El "methane slip" se refiere a la liberación de metano no quemado durante la combustión del GNL en motores y otros equipos de combustión. Este fenómeno ocurre debido a ineficiencias en la combustión, donde el metano no se oxida completamente. Las causas del methane slip incluyen el diseño de algunos motores sus condiciones operativas, que pueden afectar la eficiencia del proceso. Esto provoca que las emisiones de metano del GNL sean del orden de 25 veces mayores que la de los combustibles fósiles utilizados actualmente, y hacen que pierda potencial de descarbonización, o por lo menos que necesite ser acompañado de medidas de captura de ese metano. Es preocupante desde el punto de vista ambiental ya que el metano tiene un potencial de calentamiento global aproximadamente 25 veces mayor que el CO<sub>2</sub> en un horizonte temporal de 100 años (Global Warming Power o GWP, por sus siglas en inglés).

El metanol puede ser producido a partir de fuentes renovables como la biomasa o utilizando CO<sub>2</sub> capturado, lo que lo convierte en un candidato ideal para combustibles sostenibles. Técnicamente, el metanol es más fácil de manejar que el hidrógeno y el amoníaco y puede ser utilizado en motores diésel con modificaciones menores, con lo cual logísticamente presenta ventajas a la hora de afrontar el reto de la descarbonización. Sin embargo, su densidad energética es menor que la de los combustibles fósiles tradicionales. Económicamente, el metanol no producido a partir de biomasa tiene un coste de producción relativamente alto cuando se produce de manera sostenible, pero su capacidad para integrarse con la infraestructura existente lo hace atractivo. Por ello, por la reducción de costes que supone el producirlo a partir de biomasa, y por la consideración de biocombustible que tiene el metanol al producirse a partir de biomasa, puede resultar esclarecedor el análisis comparativo entre el metanol y el biometanol.

En la Tabla 2, se presenta una comparativa de la eficiencia energética de todos estos combustibles, mediante una comparación de sus poderes caloríficos inferiores y el rendimiento térmico general de los motores del sector marítimo que los utilizan actualmente.

*Tabla 2. Comparativa del PCI y el rendimiento térmico de los motores de los distintos combustibles alternativos.*

	<i>H2</i>	<i>Metanol</i>	<i>Amoniaco</i>	<i>GNL</i>
<b>PCI (MJ/kg)</b>	140	22,7	18,6	49
<b>Rendimiento térmico kWhm/kWh</b>	53,00%	52,50%	57,50%	49,42%



## **Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO**

### **4.1 JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS**

Ante el panorama legislativo cambiante y la importante inversión que supondrá el reto de la descarbonización del sector, se considera que sería necesaria la implementación de algún tipo de criterio con el cual tomar decisiones estratégicas en cuando a la descarbonización del sector marítimo español se refiere.

Por ello, el presente trabajo pretende facilitar el análisis y la toma de decisiones estratégicas de cara a inversiones en descarbonización de la flota, sin perder capacidad energética y sin verse mermada la actividad económica del sector. El modelo pretende analizar las emisiones para un nivel de actividad económica con una evolución dada, manteniendo como variable fija de control las necesidades energéticas de la flota. Además, mediante la construcción de un modelo de predicción de la flota española a 30 años vista, y mediante curvas de abatimiento marginal (MAC por sus siglas en inglés), se pretende crear una herramienta que pueda servir de utilidad para evaluar el impacto en costes de inversión y reducción de emisiones en caso de que el panorama económico u legislativo cambiase, o en caso de aparición de nuevas alternativas energéticas.

Las dimensiones de la industria a descarbonizar implican un gran desembolso para el reto de la descarbonización. Tal es el esfuerzo a realizar, que sería impensable imaginárselo sin una colaboración público-privada fluida o realizado de manera inmediata. De ahí surge la necesidad de tomar cada una de las decisiones en el proceso de descarbonización de una manera estudiada y ponderada, considerándose los tiempos necesarios para una consolidación paulatina de los cambios necesarios, necesitándose de estudios como este (entre otros) para la toma de las decisiones más rentables en los ámbitos económicos y medioambientales. Es por ello por lo que el modelo a desarrollar toma un horizonte temporal de 30 años desde la recogida de los datos.

## **4.2 METODOLOGÍA. CURVAS DE ABATIMIENTO MARGINAL**

El objeto del presente trabajo es el de disponer de curvas de abatimiento marginal que puedan servir de referencia en cuanto al coste por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente a reducir y un escenario económicamente viable de transición hacia una reducción de las emisiones atribuibles a España. Estas curvas, además proporcionan una idea del coste económico que presenta la implantación de cada combustible y de su potencial de descarbonización.

Las Curvas de Abatimiento Marginal (MACC, por sus siglas en inglés) son una herramienta fundamental en la evaluación de estrategias medioambientales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en términos de coste y efectividad. Una curva MACC muestra el coste marginal de cada unidad de reducción de emisiones en relación con la cantidad total de reducción alcanzable. El coste marginal se refiere al coste adicional de reducir una unidad adicional de emisiones. En la estructura de la curva, el eje X representa la cantidad total de reducción de emisiones posible, medida en toneladas de CO<sub>2</sub>, mientras que el eje Y representa el coste marginal de reducción por unidad, como euros por tonelada de CO<sub>2</sub>. Cada barra o segmento en la curva representa una medida específica de reducción de emisiones; la altura de la barra indica el coste marginal y el ancho de la barra indica la cantidad de reducción de emisiones que se puede lograr con esa medida. Por tanto, las medidas con costes negativos indican que implementarlas no solo reduce emisiones, sino que también ahorran dinero, como es el caso de mejorar la eficiencia energética. Las medidas con costes positivos, por otro lado, indican que la reducción de emisiones viene a un coste adicional.

En la toma de decisiones, las curvas MACC ayudan en la formulación de políticas y estrategias para la mitigación del cambio climático, maximizando la reducción de emisiones al menor coste posible. También facilitan la comparación entre diferentes opciones de abatimiento, permitiendo decisiones informadas sobre inversiones y políticas ambientales.

Tras estudiar el artículo publicado en la revista Nature en 2023 por Lagouvardou et al. [18] queda patente la influencia que tienen las tasas medioambientales en las decisiones estratégicas de los sectores transportistas. En el artículo y tomando un solo barco como

modelo, los autores utilizan curvas de abatimiento para analizar la influencia del tipo de combustible, el tipo de aplicación de dicho combustible en el coste energético nivelado (LCOE por sus siglas en inglés) y los valores de los impuestos por tonelada a partir de los cuales son rentables cada uno de ellos. De esta manera, los autores desgranar como la presión fiscal o aumento de costes, pueden empujar al mercado en ciertas direcciones.

Basándose en dicho artículo, el presente trabajo busca crear un modelo de la flota española con fecha de 2022 y analizar desde una perspectiva *tank-to-wake* (TtW, por sus siglas en inglés) cuales serían los combustibles con mayor sentido de operar. Se trata de un análisis de las emisiones, el coste y el ciclo de vida del combustible desde que se encuentra en el depósito del barco, incluyendo las inversiones necesarias para que así suceda.

## **Capítulo 5. ANÁLISIS DE DEMANDA**

El primer paso de la creación del modelo consiste en la elaboración de una flota representativa de la totalidad de embarcaciones que repostan en los puertos españoles. Para ello, se ha seguido el siguiente esquema:

### **1. Análisis de la plataforma THETIS**

Para comprender mejor las distintas categorías utilizadas para clasificar los buques en la industria naviera.

### **2. Análisis de los puertos españoles y obtención de datos. Categorización de la flota y definición de alcance del sector marítimo en España.**

Para extraer datos relevantes para el modelo. Se pretende organizar el set de datos original para poder llevar a cabo el modelado mediante la categorización de la flota para poder utilizar los distintos registros que representa cada tipo de barco.

### **3. Elaboración de la flota objeto de estudio.**

Para la construcción de una muestra representativa de la flota, sobre la que se tengan datos fiables y desglosados. Se pretende además observar tendencias actuales en la industria.

### **4. Análisis de la eficiencia energética de los tipos de barco más común**

Para establecer un modelo consistente de las emisiones actuales y disponer de las herramientas para establecer una predicción si nada cambia.

### **5. Análisis de emisiones.**

Para comprender las características de cada combustible evaluado, tanto de los tradicionales utilizados actualmente como las alternativas de descarbonización. El modelo tendrá como variable de control entre escenarios la energía mecánica necesaria para mantener la actividad a su nivel actual. Por ello, se analizarán las emisiones en base a las necesidades energéticas del total de la flota modelada.

### **6. Extracción de conclusiones de cara al modelado.**

Para asegurar la solidez de las asunciones que se hagan al modelar el comportamiento de la muestra bajo distintos supuestos y durante el tiempo de alcance del estudio.

**7. Cálculo de reducción de emisiones que representa cada combustible alternativo.**

Para obtener un dato fiable de las emisiones ahorradas por la implantación de cada uno de los combustibles renovables alternativos, se separa el estudio de reducción de emisiones del cálculo económico total.

### ***5.1 ANÁLISIS DE LA PLATAFORMA NAVIERA THETIS***

La plataforma THETIS es una herramienta desarrollada por la Agencia Europea de Seguridad Marítima (EMSA) para apoyar la implementación y el cumplimiento de regulaciones marítimas dentro de la Unión Europea. Su objetivo principal es mejorar la seguridad y la protección del medio ambiente en el sector marítimo. [19]

El objetivo principal de la consulta a la plataforma es el de la observación de las agrupaciones en las que las agencias europeas dividen los distintos tipos de buques principales. De cara a analizar la implantación de los combustibles, han de tenerse en cuenta características particulares de motor, eficiencia y tamaño de cada buque. En un segundo plano quedaría la de tener una visión preliminar del parque naviero español. En la Tabla 3 se puede observar las proporciones que conforman el parque naviero europeo. En el Anexo I se puede observar la información extraída completa.

*Tabla 3. Recuento de distintas categorías de barco según THETIS*

<i>Tipo de barco</i>	<i>Recuento de barcos</i>	<i>Representación del tipo de barco sobre el total</i>
Bulk carrier	4.141	31,45%
Chemical tanker	1.433	10,88%
Combination carrier	9	0,07%
Container ship	1.857	14,10%
Container/ro-ro cargo ship	60	0,46%
Gas carrier	355	2,70%
General cargo ship	1.226	9,31%
LNG carrier	392	2,98%
Oil tanker	2.001	15,20%
Other ship types	249	1,89%
Passenger ship	188	1,43%
Refrigerated cargo carrier	145	1,10%
Ro-pax ship	413	3,14%
Ro-ro ship	228	1,73%
Vehicle carrier	470	3,57%
<b>Total general</b>	<b>13.167</b>	<b>100,00%</b>

## ***5.2 ANÁLISIS DE LOS PUERTOS ESPAÑOLES Y OBTENCIÓN DE DATOS. CATEGORIZACIÓN DE LA FLOTA Y DEFINICIÓN DEL ALCANCE DEL SECTOR MARÍTIMO ESPAÑOL.***

Debido a la naturaleza internacional de los puertos marítimos, resulta complejo establecer unos parámetros que delimiten que comercio o que actividad está ligada al sector marítimo español y cuál al sector marítimo internacional. Tras analizar múltiples alternativas como la estimación de millas que realizan los barcos en aguas nacionales, y desecharlas por la complejidad de la extracción de datos, se definen en este trabajo como emisiones del sector marítimo español las correspondientes al consumo de los combustibles suministrados en puertos españoles. De esta manera, es posible modelar la flota sin tener que elaborar una base de datos detallada considerando los trayectos de cada barco.

De la misma manera, la evaluación de todos y cada uno de los puntos de atraque del país resultaría una tarea demasiado larga y difícil de modelar. Para la administración y para la literatura consultada, cuando se habla del sector del transporte marítimo se habla de toda actividad destinada al transporte de bienes o pasajeros por mar. Con ello, y de cara a obtener una muestra representativa de la flota que reposta en España, se decidió obtener los datos de los principales puertos del Estado del sector. Para el establecimiento de los criterios de selección de puertos de cara a este fin, se toma la representatividad en cuanto a número de barcos, consumo de combustible y toneladas desembarcadas.

Se eligen por tanto los puertos desglosados en la Tabla 4, debido a su relevancia según estos criterios. Si en algún momento se quisiese evolucionar el modelo a ser un reflejo escala 1:1 de la flota española, podría implementarse dicha evolución mediante la adición de datos del resto de puertos. A este efecto, se ha dejado el modelo abierto y configurado para admitir un mayor número de datos.

*Tabla 4. Relevancia de los puertos estudiados con respecto al total de los puertos españoles en el año 2022*

<i>Puerto</i>	<i>Relevancia sobre el total español según toneladas de carga transportadas</i>	<i>Relevancia sobre el total español en cuanto a avituallamiento de combustibles líquidos</i>	<i>Relevancia sobre el total español en cuanto a número de barcos</i>
Bahía de Algeciras	19,09%	38,80%	31,41%
Valencia	14,13%	3,38%	5,02%
Barcelona	12,62%	15,90%	5,54%
Cartagena	6,51%	0,46%	1,34%
Bilbao	5,85%	0,66%	1,70%
Huelva	5,72%	1,60%	1,38%
Tarragona	5,29%	0,56%	1,48%
Las Palmas	5,04%	23,52%	7,52%
Baleares	2,76%	0,02%	27,78%
<b>Total</b>	<b>77,02%</b>	<b>84,91%</b>	<b>83,17%</b>

Tras comprobar que el nivel de relevancia en todos los aspectos de la selección superaba el 75% de relevancia, se asume que es un modelo representativo del sector marítimo nacional.

El siguiente paso en la modelización de la flota española resulta ser la adecuación de las distintas categorías establecidas por la UE a los puertos nacionales. Para ello, se consultaron los registros oficiales de los puertos españoles, con finalidad doble. [20]

Primeramente, se pretendía obtener los datos de número de barcos y avituallamiento necesarios para el estudio. De igual manera, se pretendía adaptar las categorías utilizadas por la UE en aquellas que tuvieran sentido en España. De este modo, y tras un análisis de las clasificaciones oficiales de la UE sobre los distintos tipos de buques, de cara al estudio se decidió reducir el número de categorías. Se establecieron las siguientes categorías, desglosadas en la Tabla 5.

*Tabla 5. Categorización de los tipos de barco para el modelo.*

<i>Categorización</i>	<i>Desglose</i>
Tanques	Oil tanker, chemical tanker, gas carrier
Graneleros	Bulk carrier, combination carrier
Carga general	General cargo ship, refrigerated cargo ship, vehicle carrier ship
Ro-Ro	Ro-ro ship, ro-pax ship
Solo Pasaje	Passenger ship
Portacontenedores	Container, Container/ro-ro cargo ship
Otros	Other ship types

En este paso, por último, se obtuvieron los datos de número de navíos por puerto, así como un desglose según el tipo de barco y según el combustible utilizado por navío. En total, se analizaron un total de 130.661 barcos, distribuidos según el desglose de la Tabla 6.



Tabla 6. Número de barcos observados para el modelo

	Tanques	Graneleros	Carga general	Ro-Ro	Solo Pasaje	Portacontenedores	Otros	Total
Bahía de Algeciras	3,144	1,580	531	16,178	2	3,089	24,828	49,352
Valencia	254	74	1,206	3,046	211	3,009	91	7,891
Barcelona	1,187	154	308	4,149	807	2,105	1	8,711
Cartagena	984	257	447	8	410	0	0	2,106
Bilbao	739	565	474	145	149	582	14	2,668
Huelva	1,358	210	260	174	17	102	49	2,170
Tarragona	1,223	303	439	203	36	115	0	2,319
Las Palmas	1,126	1,370	1,062	5,256	451	1,715	829	11,809
Baleares	139	99	166	14,717	28,511	3	0	43,635

### 5.2.1 DEFINICIÓN DE ALCANCE DEL ESTUDIO.

El análisis del alcance de las emisiones de la flota española resulta una consideración complicada. Debido a la naturaleza móvil de la flota, es difícil el análisis del impacto geográfico de las emisiones sin hacer un análisis de rutas de los distintos buques.

Al haber definido como referencia para el estudio el consumo de combustibles del conjunto de barcos que repostaron en España en el año 2022, para el análisis adecuado del coste por tonelada de GEI alternativa, ha de ponderarse el coste exacto ponderado que ha de aplicarse.

Existen varias maneras de ponderar, al tratarse de un modelo para la descarbonización basado en datos de repostaje en puertos españoles, se tomarán datos que relacionen las emisiones asociadas al repostaje observado con el coste de la flota equivalente. De esta manera, el número de buques equivalente por tipo de barco que corresponden al esfuerzo del sector marítimo español en la descarbonización sería:

*Número de barcos tipo "b"*

$$= \frac{\text{Emisiones asociadas al tipo de barco en España en 2022}}{\text{Media de emisiones anuales por barco según datos de THETIS}}$$

Esta manera permite analizar un caso real de implantación y asociando el CAPEX con el número de barcos equivalentes a las emisiones realizadas con el combustible suministrado

en puertos españoles. De esta manera se evita obtener cifras de CAPEX demasiado altas, que conlleven costes de abatimiento por tonelada emitida irreales.

### **5.3 ELABORACIÓN DE LA FLOTA OBJETO DE ESTUDIO**

Una vez se tiene el número de barcos que servirán de modelo para el parque marítimo español, se necesita establecer el mix energético actual que utiliza cada categoría de buques. El análisis de los datos proporcionados por la plataforma de puertos del estado revela que actualmente son 3 los combustibles utilizados principalmente por el sector marítimo español. Estos son:

- **HFO (Heavy Fuel Oil):** El más utilizado por el sector marítimo, con un 85% aproximadamente. Se trate de un derivado del crudo, con un balance entre poder calorífico inferior y precio idóneo para el sector. De cara a emisiones, se trata del más nocivo para el medio ambiente, con un índice de emisiones de 80.1 gCO<sub>2</sub>/MJ de fuel. [21]
- **MGO (Maritime Gas Oil):** Representa aproximadamente el 15% del uso de combustible marítimo a nivel mundial, y tiene unos valores de emisiones algo menores al HFO (73.6 gCO<sub>2</sub>/MJ de fuel) [21]
- **GNL (Gas Natural Licuado):** El GNL goza de una situación particular dentro de los combustibles del parque actual. A nivel global, en 2022 no representaba un % significativo sobre el mix de combustibles mundiales. En España, por ejemplo, según los datos de puertos del Estado, supuso un 0.02% del combustible utilizado. Se trata de un combustible de origen no renovable. Sin embargo, debido a emitir aproximadamente un 20% de toneladas de carbón equivalente menos que el MGO, pero mantener una densidad calorífica superior a sus homólogos renovables, ha sido designado por la literatura consultada como una alternativa de transición. No se ha incluido en el modelo debido a su relevancia en el mix actual, sino debido a la tendencia observada de las navieras a optar por motores propulsados por este combustible. [21]

Debido a que España tiene presencia en varias regiones muy específicas, se decide clasificar los puertos españoles en 4 regiones. En la Tabla 7 se desglosan los puertos observados con su región y características, mientras que en la Tabla 8 se recoge un desglose de los datos del observatorio de los servicios portuarios. [22].

De cara a la elaboración del modelo se tendrán en cuenta las particularidades de cada puerto para asegurar que la contribución de cada uno al modelo es representativa del sector.

Tabla 7. Regiones marítimas españolas

Región	Puertos	Características
Estrecho y Sur	Bahía de Algeciras y Huelva	Mezcla entre gran transporte y transporte de pasajeros
Canarias	Las Palmas	Transporte de pasajeros y suministros para las islas
Mediterráneo	Cartagena, Baleares, Barcelona y Valencia	Comercio euroafricano, transporte de pasajeros y suministros a las Baleares
Atlántico-Cantabrico	Bilbao	Pesca y tanques

Tabla 8. Desglose de número de barcos que repostaron en España en 2022, desglosados por tipo de combustible y puerto

Puerto	HFO	MGO	GNL
Bahía de Algeciras	3,387,483	418,678	0
Valencia	282,039	49,612	0
Barcelona	1,325,264	233,118	936
Cartagena	38,521	6,776	27
Bilbao	61,097	3,900	39
Huelva	139,441	17,234	0
Tarragona	46,712	8,217	0
Las Palmas	1,714,901	591,862	1,384
Baleares	1,592	280	1
<b>Total</b>	<b>6,997,050</b>	<b>1,329,676</b>	<b>2,387</b>

Para que el modelo sea lo más representativo posible de las particularidades de cada tipo de buque, el procedimiento para el desglose de los datos por barco, puerto y tipo de combustible ha sido el siguiente:

- Asignación de uso de combustible total según porcentajes de uso de combustible a cada puerto según su zona. [22].**
- Asignación de un peso específico a cada tipo de barco en el consumo general.**

Se ha asumido que los datos de THETIS son directamente extrapolables al modelo en cuanto a la representación del consumo total de combustible por cada tipo de

barco. Una vez obtenidos estos pesos, se ha hallado el consumo de cada tipo de barco en cada puerto utilizando los datos de combustible repostado por cada puerto

El desglose de consumo por combustible, puerto y tipo de barco se podrá encontrar anexo al presente trabajo.

#### ***5.4 ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS MOTORES MÁS COMUNES SEGÚN LA CATEGORIZACIÓN***

Una vez se tiene el consumo en toneladas de combustible desglosado, se ha de proceder a analizar las emisiones que realiza cada categoría en cada puerto. Para ello, usando datos del International Council on Clean Transportation (ICCT por sus siglas en inglés) se procede a la asignación de los motores más comunes utilizados en cada tipo de barco y el análisis de sus características de eficiencia energética. Cabe resaltar que, gracias a la naturaleza de los motores más comunes utilizados en el sector, se ha podido simplificar el modelo analizando tan solo un tipo de motor por barco. Esto es así debido a que los motores de barco admiten indistintamente tanto HFO como MGO y GNL. [21]

La Tabla 9 muestra los motores más comunes para las categorizaciones y sus eficiencias según combustible.

Tabla 9. Motores utilizados por las distintas categorías de barco y sus eficiencias para cada tipo de combustible

	Tipo de motor	Eficiencia térmica del motor (%) para LNG	Consumo específico HFO (MJ/kWh)	Consumo específico MGO (MJ/kWh)	Consumo específico LNG (MJ/kWh)	Methane slip del LNG (gCH <sub>4</sub> /kWh)
Tanques	LPDF, medium-speed, four-stroke	48%	8.03	7.87	7.45	5.5
Graneleros	HPDF, slow-speed, two-stroke	53%	7.1	6.96	6.54	0.2
Carga general	HPDF, slow-speed, two-stroke	53%	7.1	6.96	6.54	0.2
Ro-Ro	HPDF, slow-speed, two-stroke	53%	7.1	6.96	6.54	0.2
Solo Pasaje	LPDF, medium-speed, four-stroke	48%	8.03	7.87	7.45	5.5
Porta-contenedores	HPDF, slow-speed, two-stroke	53%	7.1	6.96	6.54	0.2
Otros	LPDF, medium-speed, four-stroke	48%	8.03	7.87	7.45	5.5

De cara a que la actividad de la flota no se vea mermada, la variable fija en el modelo serán las necesidades energéticas de la flota. Teniendo como dato la eficiencia de los motores según el tipo de combustible, el proceso de análisis será el siguiente:

1. Cálculo de emisiones actuales por tipo de buque y puerto, en toneladas, para la obtención del escenario actual sobre el que realizar comparaciones.  
Utilizando factores de emisión de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> y sus respectivos índices GWP para su conversión a toneladas de carbón equivalentes
2. En paralelo, mediante el poder calorífico inferior de cada combustible, se calcularán la energía térmica suministrada a los buques por los combustibles.
3. Se analizará el rendimiento de los motores según combustible para obtener la energía mecánica a suministrar.

Desde este punto se podrá avanzar a la evaluación de combustibles alternativos, realizando el proceso inverso desde la energía mecánica necesaria para hallar las emisiones previstas por cada mix energético alternativo aplicado y sus necesidades de abastecimiento. La Ilustración 3 detalla el proceso de una manera esquemática.

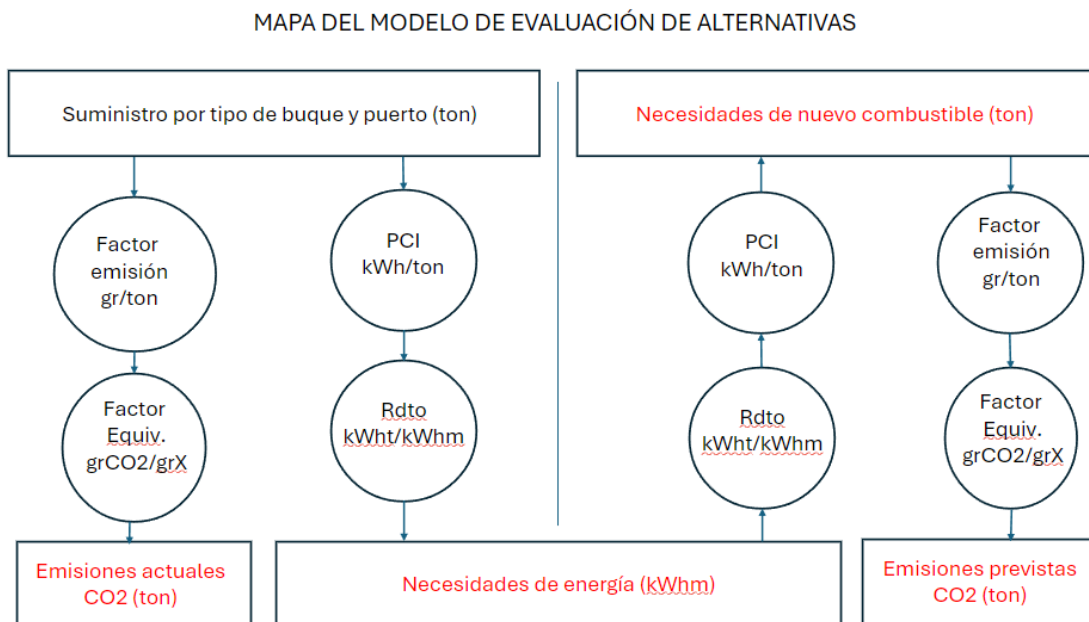


Ilustración 3. Mapa del modelo de evaluación de alternativas

Los parámetros energéticos utilizados para el modelo se han obtenido de diversas fuentes, y se pueden encontrar en la Tabla 10, convertidos a kWh/ton para mayor facilidad de uso.

*Tabla 10. Poderes caloríficos de los combustibles convencionales analizados (Precios según Repsol, [www.bunkeroil.com](http://www.bunkeroil.com) y el fabricante de motores Wartsila)*

<i>PCI combustibles</i>	<i>kWh/ton</i>	<i>PCI (kcal/g)</i>
HFO	11,680.33	10,050.00
MGO	11,872.10	10,215.00
LNG	13,611.11	11,711.28

De la misma manera, las necesidades tanto térmicas como mecánicas por combustible y puerto se encuentran desglosadas en el Anexo I. En la Tabla 11, se puede observar un agregado de las necesidades térmicas y mecánicas por tipo de barco en toda la flota modelo.

*Tabla 11. Necesidades energéticas de la flota. Resumen*

	<i>TWh<sub>t</sub></i>	<i>TWh<sub>m</sub></i>
<b>Graneleros</b>	14,9	<b>7,6</b>
<b>Portacontenedores</b>	30,7	<b>15,6</b>
<b>Carga general</b>	4,4	<b>2,3</b>
<b>Tanques</b>	25	<b>11,2</b>
<b>Otros</b>	1,2	<b>0,6</b>
<b>Solo Pasaje</b>	5,4	<b>2,4</b>
<b>Ro-Ro/Ro-Pax</b>	15,6	<b>7,9</b>
<b>Total</b>	97,5	<b>47,7</b>

## **5.5 ANÁLISIS DE EMISIONES. MECANISMO DE MODELADO DE LA DESCARBONIZACIÓN**

Una vez se tienen las necesidades térmicas de la flota, se pasa a calcular las emisiones. Primero, se considerará el mix de combustibles a la hora de modelar los consumos. Seguidamente, se calcularán las emisiones según los índices de contaminación de cada uno de los combustibles tradicionales, teniendo en cuenta el *methane slip* de los barcos de GNL.



Finalmente, y para tener una medida de análisis común, se convertirá todo a tCO<sub>2</sub> equivalentes, usando para ello los índices GWP.

### **5.5.1 CONSUMO DE COMBUSTIBLES POR PUERTO**

Teniendo en cuenta el mix energético mencionado anteriormente, y las necesidades de avituallamiento de combustibles líquidos desglosado para el año 2022 por el observatorio de puertos del Estado, se tienen los consumos desglosados en la Tabla 12.

Tabla 12. Toneladas consumidas de cada tipo de combustible por puerto

<i><b>Puerto</b></i>	<i><b>Toneladas Enero-Diciembre</b></i>	<i><b>HFO</b></i>	<i><b>MGO</b></i>	<i><b>GNL</b></i>
Bahía de Algeciras	3,806,161	3,387,483	418,678	0
Valencia	331,850	282,039	49,612	199
Barcelona	1,559,318	1,325,264	233,118	936
Cartagena	45,324	38,521	6,776	27
Bilbao	64,997	61,097	3,900	0
Huelva	156,675	139,441	17,234	0
Tarragona	54,962	46,712	8,217	33
Las Palmas	2,307,455	1,714,901	591,862	692
Baleares	1,873	1,592	280	1
<b>Total</b>	<b>8,328,615</b>	<b>6,997,050</b>	<b>1,329,676</b>	<b>1,888</b>

Dichos datos, son convertidos mediante sus PCI a MJ térmicos necesarios por puerto, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Necesidades energéticas por puerto y combustible (MJt)

	<i><b>HFO</b></i>	<i><b>MGO</b></i>	<i><b>LNG</b></i>
Bahía de Algeciras	142,440,962,358	17,894,101,107	0
Valencia	11,859,527,564	2,120,376,886	9,756,390
Barcelona	55,726,306,471	9,963,362,500	45,843,949
Cartagena	1,619,771,666	289,600,609	1,332,526
Bilbao	2,569,087,541	166,676,591	0
Huelva	5,863,371,985	736,584,262	0
Tarragona	1,964,210,800	351,183,229	1,615,883
Las Palmas	72,110,196,459	25,295,930,329	33,919,589
Baleares	66,936,553	11,967,654	55,066
<b>Total</b>	<b>294,220,371,398</b>	<b>56,829,783,167</b>	<b>92,523,402</b>

## 5.5.2 CÁLCULO DE EMISIONES POR PUERTO Y COMBUSTIBLE

Se tienen los siguientes datos de coeficientes de emisiones, desglosados en la Tabla 14.

Tabla 14. Coeficientes de emisión y conversión a tCO<sub>2</sub> equivalente por combustible [21]

(g/MJ fuel)	HFO	MGO	LNG	GWP
CH <sub>4</sub>	0.00	0.00	0.02	25
N <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	298
CO <sub>2</sub>	80.10	73.60	56.50	1

Lo que arroja los datos de emisiones desglosados en las Tablas 15 y 16:

Tabla 15. Toneladas de agentes contaminantes por puerto y combustible

(toneladas)	HFO			MGO			LNG		
	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>
Bahía de Algeciras	107	556	11,409,521	13	70	1,317,006	0	0	0
Valencia	9	46	949,948	2	8	156,060	0	0	551
Barcelona	42	217	4,463,677	7	39	733,303	1	0	2,590
Cartagena	1	6	129,744	0	1	21,315	0	0	75
Bilbao	2	10	205,784	0	1	12,267	0	0	0
Huelva	4	23	469,656	1	3	54,213	0	0	0
Tarragona	1	8	157,333	0	1	25,847	0	0	91
Las Palmas	54	281	5,776,027	19	99	1,861,780	1	0	1,916
Baleares	0	0	5,362	0	0	881	0	0	3

Tabla 16. Toneladas equivalentes de dióxido de carbono por puerto y combustible emisor

	HFO			MGO			LNG			Total por puerto
	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	
Bahía de Algeciras	2,671	165,545	11,409,521	336	3,999	1,317,006	0	0	0	12,899,077
Valencia	222	13,783	949,948	40	474	156,060	4	5	551	1,121,087
Barcelona	1,045	64,765	4,463,677	187	2,227	733,303	21	22	2,590	5,267,837
Cartagena	30	1,882	129,744	5	65	21,315	1	1	75	153,118
Bilbao	48	2,986	205,784	3	37	12,267	0	0	0	221,126
Huelva	110	6,814	469,656	14	165	54,213	0	0	0	530,971
Tarragona	37	2,283	157,333	7	78	25,847	1	1	91	185,678
Las Palmas	1,352	83,806	5,776,027	474	5,654	1,861,780	15	16	1,916	7,731,042
Baleares	1	78	5,362	0	3	881	0	0	3	6,328
<b>Total</b>	<b>5,517</b>	<b>341,943</b>	<b>23,567,052</b>	<b>1,066</b>	<b>12,701</b>	<b>4,182,672</b>	<b>42</b>	<b>44</b>	<b>5,228</b>	<b>28,116,264</b>

### 5.5.3 METHANE SLIP

Una vez se tienen los datos de emisiones base, es necesario completar las emisiones de GNL con uno de sus principales componentes contaminantes, el *methane slip*. Como el cálculo de consumo por tipo de combustibles se ha hecho basado en los porcentajes de consumo de los puertos, es lógico pensar que el cálculo del *methane slip* producido por el uso de GNL también haya de ser así calculado.

Se parte de unos coeficientes de *methane slip* ( $\text{gCH}_4/\text{kWh}$ ) para cada tipo de motor. Al tener las proporciones de barcos con cada tipo de motor y las proporciones de utilización de GNL en cada puerto, es posible realizar una media ponderada por puerto que incorpore los 3 factores. Para su cálculo, se tiene la siguiente fórmula:

*Methane slip* (puerto)

$$= [ \text{Factor Methane slip}_{\text{Barcos } i} \quad \dots \quad \text{Factor methane slip}_{\text{Barcos } n} ]_{\text{puerto}} \times \begin{bmatrix} \%_{\text{Barcos } i} \\ \dots \\ \%_{\text{Barcos } n} \end{bmatrix}_{\text{puerto}}$$

En donde  $[ \text{Barcos}_i \quad \dots \quad \text{Barcos}_n ]$  representa la matriz de categorías de buques considerada para cada puerto.

El dato de *methane slip* por puerto se pasa a gCH<sub>4</sub>/MJ y es multiplicado por el consumo de LNG en MJ por cada puerto. Los datos de emisiones del año 2022 resultantes con el ajuste del *methane slip* se pueden observar en la Tabla 17.

*Tabla 17. Toneladas equivalentes por puerto ajustadas para el methane slip del GNL*

	<b>HFO</b>			<b>MGO</b>			<b>LNG</b>			<b>Total por puerto</b>
	<b>CH4</b>	<b>N2O</b>	<b>CO2</b>	<b>CH4</b>	<b>N2O</b>	<b>CO2</b>	<b>CH4</b>	<b>N2O</b>	<b>CO2</b>	
Bahía de Algeciras	2,671	165,545	11,409,521	336	3,999	1,317,006	0	0	0	12,899,077
Valencia	222	13,783	949,948	40	474	156,060	43	5	551	1,121,126
Barcelona	1,045	64,765	4,463,677	187	2,227	733,303	471	22	2,590	5,268,287
Cartagena	30	1,882	129,744	5	65	21,315	35	1	75	153,152
Bilbao	48	2,986	205,784	3	37	12,267	0	0	0	221,126
Huelva	110	6,814	469,656	14	165	54,213	0	0	0	530,971
Tarragona	37	2,283	157,333	7	78	25,847	35	1	91	185,712
Las Palmas	1,352	83,806	5,776,027	474	5,654	1,861,780	317	16	1,916	7,731,343
Baleares	1	78	5,362	0	3	881	1	0	3	6,329
<b>Total</b>	<b>5,517</b>	<b>341,943</b>	<b>23,567,052</b>	<b>1,066</b>	<b>12,701</b>	<b>4,182,672</b>	<b>902</b>	<b>44</b>	<b>5,228</b>	<b>28,117,124</b>

Desde este punto en adelante se considerará que todos los datos de emisiones equivalentes asociados al GNL incluyen el cálculo del *methane slip*. Estos datos serán sobre los que se trabaje para establecer la reducción posible mediante distintos escenarios de implantación de las alternativas renovables.

## ***5.6 EXTRACCIÓN DE CONCLUSIONES DE CARA AL MODELO DE IMPLANTACIÓN Y DE CURVAS DE ABATIMIENTO***

En tanto que la realización de las curvas de abatimiento se realizará de manera unitaria estudiando un barco de cada categoría, se podrá realizar el estudio tanto observando el equivalente unitario de emisiones y consumos de cada barco con respecto a los datos obtenidos como analizando ejemplos concretos de cada tipo de barco.

En cuanto a la implantación, se modelará asumiendo que, al ser los barcos elementos móviles, no emiten todas sus emisiones en aguas españolas. La matización de la inversión

proporcional correspondiente al sector español para hacer frente a la descarbonización se hará suponiendo que el mismo es tan solo responsable de las emisiones generadas por el avituallamiento producido en sus puertos.

Para poder modelarlo con los datos de emisiones ya obtenidos, se le aplicará un factor de corrección al valor neto actual (VAN) de la inversión necesaria correspondiente a las emisiones promedio del estudio por tipo de barco con respecto a la emisión anual promedio de cada tipo de barco según THETIS, tal y como se ha explicado en el punto 5.2. Dichos datos se encuentran recogidos en la Tabla 18.

*Tabla 18. Factores de corrección a la hora de calcular el esfuerzo inversor relativo a la flota de referencia*

	<i>Toneladas anuales promedio por barco</i>	<i>Barcos</i>	<i>Toneladas achacables</i>	<i>Toneladas totales 2022</i>	<i>Factor aplicable</i>
Graneleros	12.653,00	4.612	58.355.636	4.326.934	7,415%
Portacontenedores	29.666,27	10.720	318.022.414	8.869.185	2,789%
Carga general	6.218,24	4.893	30.425.848	1.286.144	4,227%
Tanques	7.564,00	10.154	76.804.856	7.221.45	9,402%
Otros	7.135,66	25.812	184.185.655	361.543	0,196%
Solo Pasaje	36.836,00	30.594	1.126.960.584	1.582.390	0,140%
Ro-Ro/Ro-Pax	30.809,43	43.876	1.351.794.550	4.522.551	0,335%

## **5.7 CÁLCULO DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CADA COMBUSTIBLE ALTERNATIVO**

Como se ha mencionado anteriormente, la variable de control fija entre escenarios será la necesidad energética de cada tipo de barco en cada tipo de puerto. Para el modelado de las curvas de abatimiento se calculará la reducción unitaria por tipo de barco. Este mismo dato, generalizado para toda la flota modelo, se utilizará bajo ciertos criterios de modelado y condiciones de contorno en el modelo de implantación.

Para que el modelado sea coherente con las curvas de abatimiento, se considerarán como escenarios la sustitución de la flota actual por cada uno de las distintas alternativas de combustible, empezando en 2022 y sustituyendo el mix energético en su totalidad.

Siguiendo el esquema de calculo detallado en la Ilustración 3, el cálculo se realizará mediante el uso de los rendimientos de los distintos motores estudiados de la flota actual para cada tipo de barco para la conversión de las necesidades mecánicas de cada puerto a necesidades de suministro de combustible (en MJ térmicos) y su posterior conversión a emisiones, utilizando los rendimientos de los motores de los combustibles renovables.

En la Tabla 19 se muestran los distintos PCI (o contenido energético específico equivalente) así como los distintos rendimientos utilizados para modelar los escenarios de sustitución de demanda actual por las distintas alternativas de combustible.

*Tabla 19. Parámetros de eficiencia de los combustibles alternativos. (Reglamento FuelEU)*

	<i>H2 (PEM)</i>	<i>Metanol</i>	<i>Amoniaco</i>	<i>GNL</i>
<b>PCI (MJ/kg)</b>	140	22.7	18.6	49
<b>Rendimiento térmico (kWhm/kWh)</b>	53%	52.50%	57.50%	49.42%

La reducción en las emisiones viene marcada por el rendimiento de los motores seleccionados, así como los índices emisores de cada combustible, de acuerdo con la siguiente fórmula:

*Reducción de emisiones*

$$= 1 - \left( \frac{k \left[ \frac{tCO_2}{\text{Rendimiento } MWhPCI} \right]_{\text{Motor y combustibles alternativos}}}{\eta \left[ \frac{MWhm}{\text{Rendimiento } MWhPCI} \right]_{\text{Motor y combustible original}}} \right)$$

En el Anexo I se pueden observar desglosados por puerto y tipo de barco las emisiones bajo los supuestos del modelo. En la Tabla 20 se presenta la reducción inmediata por alternativa frente a la situación actual de la flota, correspondiente a lo que se evitaría por tipo de barco si en el año 2022 ya se hubiesen implementado las alternativas.

*Tabla 20. Reducción inmediata frente a situación actual de la flota*

	<i>GNL</i>	<i>Amoniaco</i>	<i>Metanol</i>	<i>H2</i>
<b>Graneleros</b>	24.53%	11.27%	16.66%	100%
<b>Portacontenedores</b>	24.53%	11.27%	16.66%	100%
<b>Carga general</b>	24.53%	11.27%	16.66%	100%
<b>Tanques</b>	33.27%	21.55%	26.31%	100%
<b>Otros</b>	33.27%	21.55%	26.31%	100%
<b>Solo Pasaje</b>	33.27%	21.55%	26.31%	100%
<b>Ro-Ro/Ro-Pax</b>	24.53%	11.27%	16.66%	100%
<b>Total (ponderación flota de referencia)</b>	<b>27.37%</b>	<b>14.61%</b>	<b>19.80%</b>	<b>100%</b>



## **Capítulo 6. MODELO ECONÓMICO**

Para la evaluación económica de la de implantación de las nuevas tecnologías, así como para la obtención de las curvas de abatimiento, es necesario construir un modelo cuyas características generales se recogen en el siguiente esquema:

**1. Metodología y condiciones de contorno generales.**

Definición de la metodología a utilizar.

**2. Hipótesis sobre el combustible.**

Definición de franjas de precios y evolución temporal de los mismos durante la duración del estudio.

**3. Hipótesis sobre el CAPEX.**

Definición de precios utilizados, implantación de tasas de renovación a raíz de las vidas medias de cada tipo de barco.

**4. Hipótesis sobre el Caso Base.**

Definición de las tasas de descuento utilizadas, tasas de crecimiento esperadas, cálculo de costes operacionales (OPEX) y tasas de emisión de CO<sub>2</sub>.

Los resultados del análisis económico se podrán observar anexados a este trabajo.

## **6.1 METODOLOGÍA Y CONDICIONES DE CONTORNO GENERALES**

La metodología utilizada en el presente modelo está basada en un estudio publicado en la revista Nature, por Lagouvardou [18]. En el mismo, se pretende llegar a conclusiones de la tasa de emisiones que se debería aplicar para hacer la descarbonización rentable para su aplicación al sector marítimo, utilizando como modelo un único navío.

El presente modelo bebe de la metodología aplicada, buscando aplicar los mismos principios de cálculo a una mayor escala, incluyendo la renovación de la flota. Además, como el objetivo del estudio no es el de la determinación de tasas de emisiones necesarias, sino el de analizar los costes derivados del abatimiento bajo ciertos supuestos, se dejan fijas las tasas de emisiones, bajo ciertos parámetros de comportamiento.

La fórmula general de determinación de ahorro de emisiones en el periodo de estudio responde a la siguiente ecuación:

$\Delta Emisiones$

= Emisiones en un escenario de no descarbonización

– Emisiones en un supuesto de sustitución por combustible alternativo para la descarbonización

La fórmula general de determinación de costes incurridos bajo cada supuesto de sustitución se puede desglosar como:

$$\begin{aligned} \Delta Costes &= Costes_{Alt,descarb} - Costes_{Base} \\ &= \Delta CAPEX + \Delta OPEX - \Delta Tasas de emisiones pagadas \end{aligned}$$

Cabe resaltar que, al tratarse de fórmulas diferenciales y, bajo la suposición de que el mantenimiento de los barcos se realizará de la misma manera en todos los supuestos, en el cálculo del OPEX se omitirá el cálculo de costes por mantenimiento de la flota, y se modelarán tan solo como el coste de combustible que la flota pueda tener.

Al estar trabajando en un horizonte temporal de 30 años, el modelo necesitará de una manera de analizar el coste del dinero de una manera ponderada por el coste de inversión/inflación

anualizada. Es por ello que, para un análisis certero de toda cantidad monetaria utilizada en el modelo, se utilizará un Valor Actual Neto (VAN) para su cálculo.

De manera lógica, el modelo necesitará de la creación de un caso base “*business as usual*” que intente modelar de la forma más fiel posible el comportamiento de la flota bajo el mix energético actual y con unas previsiones de crecimiento de la actividad de acuerdo con lo previsto hasta ahora.

### **6.1.1 CONDICIONES DE CONTORNO DEL MODELO**

Las siguientes condiciones de contorno servirán como base del modelo para el análisis propuesto:

- Alcance de 30 años.
- Crecimiento anualizado de la actividad naviera modelado como un 2,69% interanual, al anualizar previsiones [23]
- Para el descuento de los flujos de caja a lo largo de los años, se utiliza una tasa de descuento inicial del 8%, pretendiendo ser un reflejo aproximado del índice americano S&P500. Se ha determinado así inicialmente debido a su representatividad histórica de los rendimientos de capital esperados por el grueso de los inversores internacionales. Más adelante, se desarrollará sobre el efecto que la tasa tiene en el modelo.
- Se ha considerado un escenario desde el punto de vista del análisis del abatimiento. Por ello, se sustituye la flota de golpe en el año 0 del proyecto, resultando en un impacto de CAPEX muy elevado. Se ha decidido modelar así debido a varios factores:
  1. Se busca analizar el impacto en emisiones de estas tecnologías si estuviesen funcionando actualmente.
  2. La literatura consultada [18] realiza los cálculos de forma unitaria para un solo tipo de barco, e incurre en los costes de renovación en el primer año del proyecto. Para seguir una metodología consistente con la literatura, aunque ampliando el horizonte en cuanto a tipos de barco y

alcance temporal, se ha decidido mantener el momento de la inversión igual. Si bien es verdad que el momento óptimo de inversión será diferente para cada tipo de barco, se deja ese análisis propuesto para futuros trabajos, por estar fuera del alcance del proyecto.

## **6.2 HIPÓTESIS SOBRE EL COMBUSTIBLE**

Para el modelado de los costes operativos de la flota, se tomarán los costes de combustible. Debido a tratarse de *commodities*, con un comportamiento fuertemente dependiente de cuestiones geopolíticas y otros factores, se ha tratado de utilizar hipótesis razonadas fuera de cuestiones externas a la inflación y desarrollo de los combustibles

### **6.2.1 EVOLUCIÓN DEL PRECIO DE LOS COMBUSTIBLES DEL MIX ACTUAL**

La plataforma “Ship and bunker” proporciona una franja de precios para los principales combustibles utilizados a día de hoy en el sector. De manera inicial, se ha considerado el precio como si fuese el precio medio entre los valores más extremos del rango. Dichos precios pueden observarse en la Tabla 21.

*Tabla 21. Precios considerados para los combustibles del mix del caso base para el año 2022  
(www.shipandbunker.com)*

	<i>Combustible (\$/kWh)</i>		
	<b>HFO</b>	<b>MGO</b>	<b>LNG</b>
<i>Precio upper bound</i>	0.095	0.091	0.081
<i>Precio lower bound</i>	0.038	0.063	0.032
<i>Precio inicial elegido</i>	0.07	0.08	0.06

Para el modelado de la evolución del precio del combustible se utilizará una tasa de crecimiento anual. La variación de dicha tasa reflejará un análisis de comportamiento bajo distintos supuestos de comportamiento económico del combustible. Inicialmente, y para que

el precio del combustible no tenga un peso superior a otras variables que intervienen en el análisis, se igualará la tasa de crecimiento a la tasa de descuento interanual inicial. Una vez se tiene el supuesto de partida, el modelo permitirá asumir distintos escenarios para el análisis de sensibilidad. Los escenarios permiten observar como influenciaría el precio del combustible al coste de abatimiento de emisiones de GEI según su evolución. Se contemplará un escenario favorable y un escenario desfavorable, además del escenario neutro inicial. Las tasas correspondientes a los escenarios favorable y desfavorable son de un **+4% interanual** para el caso favorable (en cuanto a que es favorable para la adopción de alternativas de descarbonización) y de un **-4% interanual** en el caso desfavorable con respecto al caso neutro. La decisión de la tasa del caso neutro, al estar forzosamente vinculada a la tasa de descuento que se utilizará para todo el modelo, se explicará más adelante en el presente trabajo.

### **6.2.2 EVOLUCIÓN DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS CONSIDERADOS**

Al ser combustibles mucho menos desarrollados, la descripción de la evolución de los precios de los combustibles alternativos resulta mucho más compleja. Por tanto, debido a la falta de datos históricos fiables, y a la prevista volatilidad debido a su desarrollo, se evitará hacer hipótesis acerca del precio del amoníaco, metanol e hidrógeno y se incorporarán datos del instituto Maersk Mc-Kinney.

El instituto Maersk Mc-Kinney Moller es la fundación sin ánimo de lucro creada por el fundador de la naviera internacional Maersk, con el objetivo de incentivar la descarbonización del sector marítimo. En su portal web, ofrecen una herramienta de cálculo de costes de combustibles alternativos según localización geográfica. Para el presente estudio se han tomado datos previstos correspondientes al *bunkering* en la región europea. [22].

Según el portal observado, los precios de 2022 a 2024 fueron los indicados en la Tabla 22.

*Tabla 22. Precios observados de combustibles alternativos de 2022-2024*

	<i>Precios observados</i>		
	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>
<b>\$/GJ</b>			
Hidrógeno	35.7	34.1	32.6
Amoníaco	61.0	57.4	54
Metanol	76.8	73.5	70.3
<b>\$/kWh</b>			
Hidrógeno	1.28	1.23	1.17
Amoníaco	2.20	2.07	1.94
Metanol	2.77	2.65	2.53

Se prevé que durante el horizonte temporal observado por este modelo, los precios de los combustibles alcancen la competitividad económica frente a los combustibles fósiles actuales, reduciendo sus costes entre un 65 y un 70% desde el 2022. Anexo a este documento se incluyen los precios considerados, así como la evolución detallada de los mismos.

### **6.3 HIPÓTESIS SOBRE EL CAPEX**

Debido a la naturaleza de esta industria, altamente intensiva en costes, los costes de inversión son de los factores con mayor peso en el cálculo del coste de abatimiento final. Por ello, a la hora de modelar los costes de inversión derivados de la renovación de la flota, se han tenido en cuenta los siguientes razonamientos y hipótesis.

#### **6.3.1 TASA DE RENOVACIÓN DE LA FLOTA**

Toda flota en condiciones de operaciones requiere una renovación progresiva, para evitar el envejecimiento de la misma. Para tener en cuenta estrictamente el esfuerzo de renovación de combustibles de la flota, y no añadirle cargas por un esfuerzo para rejuvenecer la flota, se modela la renovación de tal manera que la flota mantenga su vida media constante. Para ello, se tomaron de distintas fuentes [24] [25] los valores de vida media de cada tipo de barco, y se calculó la tasa de renovación como el inverso de la vida útil del barco, alcanzándose los siguientes resultados, mostrados en la Tabla 23. Nótese que para los precios de los barcos

no se contempla una evolución, de manera que se pueda hacer un correcto análisis de como está la situación de rentabilidad de la tecnología a día de hoy.

*Tabla 23. Tasas de renovación de los distintos tipos de barco*

	<i>Vida útil</i>	<i>Vida media</i>	<i>Tasa de renovación</i>
Graneleros	22,2	11,1	4,50%
Portacontenedores	27,4	13,7	3,65%
Carga general	54,2	27,1	1,85%
Tanques	39,4	19,7	2,54%
Otros	47,6	23,8	2,10%
Solo pasaje	42	21	2,38%
Ro-ro/Ro-pax	42	21	2,38%

Para la correcta integración de la tasa de renovación con la tasa de crecimiento orgánico de la actividad del sector, se implementará la tasa de renovación de la siguiente manera:

Se llevará a cabo la sustitución íntegra de la flota en el año 0 del proyecto, tan solo comenzando a incorporarse en el CAPEX la renovación de la flota cuando cada tipo de barco alcance su vida media. De esta manera, el modelo refleja el comportamiento de la flota si se lleva a cabo una renovación completa en el año 0, pero sin verse la vida útil de la misma afectada con respecto al caso base original, modelado también con renovación de la flota.

Por tanto, para los años en donde todavía los barcos no hayan alcanzado su vida media desde la renovación inicial se modelará como:

$$CAPEX_{T,b} = C * P_b * B_{T-1}$$

En los años donde cada flota de cada tipo de barco haya alcanzado ya su vida media:

$$CAPEX_{T,b} = (C + R_b) * P_b * B_{T-1}$$

en donde,

- $CAPEX_{T,b}$  = CAPEX requerido en el año T para el tipo de barcos b.
- $C$  = Tasa de crecimiento de actividad.
- $P_b$  = Precio de *newbuild* por cada barco del tipo b.
- $R_b$  = Tasa de renovación por cada tipo de barco b para mantener constante la edad media de la flota.
- $B_{T-1}$  = Barcos del tipo b existentes en el año anterior a T.

### **6.3.2 METODOLOGÍA DE RENOVACIÓN DE LA FLOTA**

Existen dos opciones principales de cara a cambiar el método de propulsión de cualquier vehículo, reemplazarlo por uno nuevo con un método de propulsión deseado (*newbuild*, por su denominación en inglés) o cambiarle el método de propulsión o motor (*retrofitting*).

El *retrofitting* se trata de una solución muy eficiente cuando se pretende darle una nueva vida a un vehículo. Mediante el reaprovechamiento del resto de partes del vehículo, se consigue no generar residuos innecesarios, y ahorrarse parte de los gastos de inversión iniciales requeridos para la descarbonización.

Sin embargo, no se ha considerado adecuado a efectos de este estudio modelar la renovación de la flota integrando opciones de *retrofitting* debido a los siguientes motivos:

- Falta de un criterio global consensuado donde sea aconsejable aplicarlo.
- Falta de datos globales sobre la amortización o vida útil de un barco al que se le ha aplicado.
- Falta de datos globales específicos por tipo de barco sobre el tiempo que es capaz de prorrogar el *retrofitting* la vida útil de un barco, imposibilitando por tanto una correcta aplicación del alcance temporal del estudio.



- Falta de datos globales y consideraciones sobre el gasto extra de mantenimiento que requerirían los componentes externos al motor del navío al estar viendo su vida útil prorrogada.
- Necesidad actual global de establecer alternativas duraderas para la descarbonización, para el correcto aprovechamiento de las altas inversiones requeridas.

Es por ello, especialmente por el último motivo mencionado, por lo que se decide modelar la renovación de la flota mediante barcos nuevos o *newbuild*. Los costes de inversión de los barcos nuevos, previa consulta a varias fuentes [26] [27] [28] [18] [29], se desglosan en la Tabla 24.

*Tabla 24. Costes de inversión en nuevos barcos*

<b>NEWBUILD</b> (en millones de dólares)	<b>LNG</b>	<b>Amoniaco</b>	<b>Metanol</b>	<b>Hidrogeno</b>	<b>HFO</b>	<b>MGO</b>
Graneleros	120	145,8	96	192	75	75
Portacontenedores	120	145,8	96	192	60	60
Carga general	60	130	48	96	146,9	175,5
Tanques	80	120	64	128	135,6	162
Otros	50	60	40	80	56,5	67,5
Solo Pasaje	60	60	48	96	67,8	81
Ro-Ro/Ro-Pax	90	70	72	144	79,1	94,5

## **6.4 HIPÓTESIS SOBRE EL CASO BASE**

El caso base constituye la parte más crítica del modelo, ya que contra él se medirán todas las mejoras que puedan plantear las alternativas. De esta manera, y siguiendo la metodología, se ha modelado teniendo en cuenta las siguientes hipótesis:

- **La flota actual no cambia su mix tecnológico, se limita a crecer en número con la tasa de crecimiento antes mencionada.** De esta manera, los costes operacionales del caso base están supeditados a:
  - o **Costes de inversión de barcos de HFO y MGO:** Al utilizar los mismos motores, resultan iguales unos a otros.

- **Costes de inversión de barcos de LNG:** En el caso base, tienen poco impacto en los costes, debido al bajo porcentaje actual de este combustible en el mix.
- **Costes de combustible de LNG, MGO y HFO.**
- **Tasas de emisiones.**

En la Figura 1 se muestra la evolución lineal del tamaño de flota desglosado por tipo de barco en el alcance temporal considerado.

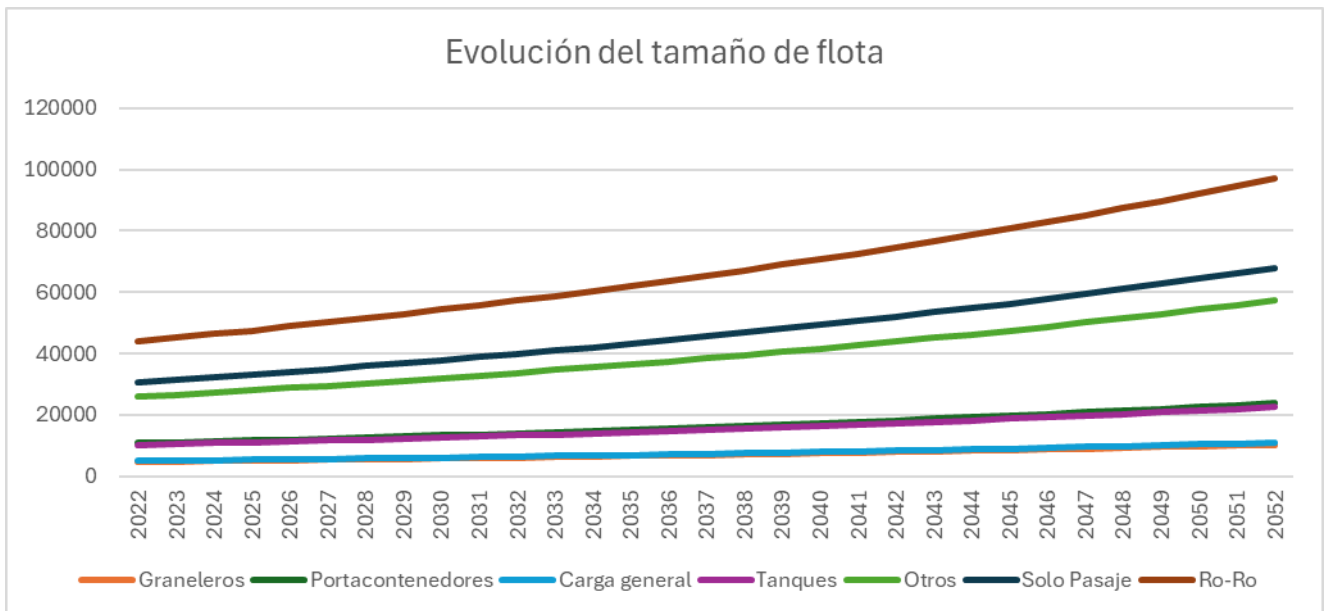


Figura 1. Evolución del tamaño de flota desglosado por tipo de barcos

- **El precio de las emisiones se mantendrá igual para el caso base y para las alternativas en todo momento.** El precio de las emisiones y su evolución temporal vienen dados por el portal enerdata.net [31], siendo previsiones los datos de 2024 en adelante y valores registrados las emisiones para los datos de 2022, 2023 y 2024. El perfil temporal de dicho coste se muestra en la Figura 2.

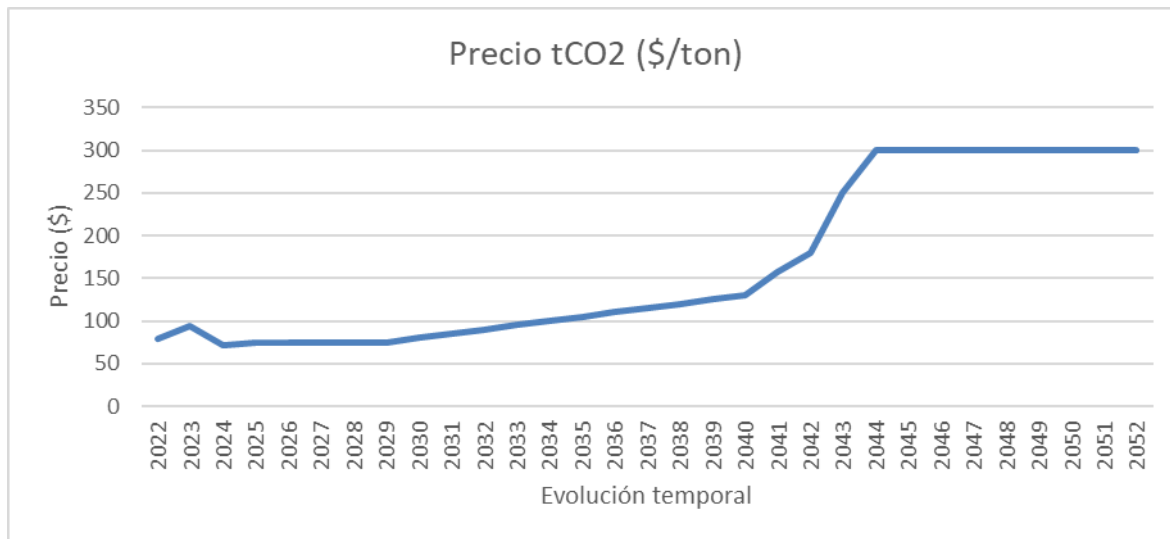


Figura 2. Evolución del coste de emisiones en \$/tCO2 ([www.enerdata.net](http://www.enerdata.net))

Como se puede observar en la Figura 1, el perfil experimenta un crecimiento casi exponencial a mediados de la década de los años 40, debido a la cada vez mayor dificultad de mantenerse por debajo de los niveles establecidos por la UE. De cara al modelo, y por no basar el caso base en hipótesis extremas, se ha suavizado el crecimiento exponencial mencionado por el portal. El perfil temporal de dicho coste responde a una hoja de ruta de la Unión Europea siempre y cuando no haya eventos de causa mayor o cambios de políticas de emisiones. En previsión de que las pueda haber, se ha dejado el modelo abierto a modificaciones de dicho perfil. Esta característica del modelo permitirá realizar un análisis de sensibilidades de los datos obtenidos del modelo respecto a la variación de este perfil, por ejemplo, adelantando o retrasando la subida exponencial apreciable en el año 2042.

Ya que uno de los objetivos del modelo es permitir el análisis de los objetivos regulatorios, se permite una curva tan pronunciada, para así evaluar la posible necesidad de revisión del sistema.

## Capítulo 7. RESULTADOS. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

### 7.1 ESCENARIO ACTUAL

Tras la elaboración del modelo, la obtención de resultados globales económicos para la renovación de toda la flota observada, y la posterior aplicación de los factores de corrección para la observación del porcentaje de inversión atribuible a la flota modelo, los resultados económicos, en valor actual neto del proyecto se presentan en las Tablas 25 y 26.

Tabla 25. Resultados económicos globales de los distintos escenarios (VAN)

(M\$)	<i>Caso Base</i>	<i>LNG</i>	<i>Amoniaco</i>	<i>Metanol</i>	<i>Hidrógeno</i>
<b>Graneleros</b>	399.542	983.700	1.372.928	1.080.607	1.550.354
<b>Portacontenedores</b>	679.485	2.142.451	3.000.046	2.305.829	3.445.054
<b>Carga general</b>	461.112	425.348	977.978	414.612	717.526
<b>Tanques</b>	1.079.962	1.257.008	2.158.126	1.391.774	2.143.316
<b>Otros</b>	953.675	1.850.185	2.221.173	1.519.597	2.905.291
<b>Solo Pasaje</b>	1.450.512	2.691.259	2.772.010	2.282.465	4.200.441
<b>Ro-Ro/Ro-Pax</b>	2.453.413	5.808.342	4.905.868	5.006.866	9.108.905
<b>Total</b>	<b>7.477.701</b>	<b>15.158.292</b>	<b>17.408.128</b>	<b>14.001.750</b>	<b>24.070.887</b>

Tabla 26. Porcentaje aplicable a la flota de referencia según emisiones generadas.

(M\$)	<i>Factor aplicado</i>	<i>Caso Base</i>	<i>LNG</i>	<i>Amoniaco</i>	<i>Metanol</i>	<i>Hidrógeno</i>
<b>Graneleros</b>	<b>7,41%</b>	\$29.625	\$72.939	\$101.799	\$80.124	\$114.955
<b>Portacontenedores</b>	<b>2,79%</b>	\$18.950	\$59.750	\$83.667	\$64.306	\$96.078
<b>Carga general</b>	<b>4,23%</b>	\$19.492	\$17.980	\$41.341	\$17.526	\$30.331
<b>Tanques</b>	<b>9,40%</b>	\$101.542	\$118.188	\$202.915	\$130.859	\$201.522
<b>Otros</b>	<b>0,20%</b>	\$1.872	\$3.632	\$4.360	\$2.983	\$5.703
<b>Solo Pasaje</b>	<b>0,14%</b>	\$2.037	\$3.779	\$3.892	\$3.205	\$5.898
<b>Ro-Ro/Ro-Pax</b>	<b>0,33%</b>	\$8.208	\$19.432	\$16.413	\$16.751	\$30.475
<b>Total</b>		<b>\$181.725</b>	<b>\$295.700</b>	<b>\$454.387</b>	<b>\$315.755</b>	<b>\$484.961</b>

Los resultados obtenidos muestran un VAN de la inversión durante el tiempo de estudio más que considerable, sobre todo si se usan datos como el PIB español del año 2024 (1.461.889 millones de euros). Cabe recordar que no se trata de una inversión instantánea, sino el valor actual neto del conjunto de flujos inversores descontados con un cambio interanual de valor de capital relativamente altos. Modelando el crecimiento económico nacional con el mismo crecimiento a lo largo de los años del proyecto, la renovación de la flota supondría aproximadamente una inversión anual del 0,5% del PIB en el caso menos intensivo (Caso Base) y de aproximadamente el 1,16% de media en el caso más intensivo de capital (Caso Hidrógeno).

Al ser uno de los objetivos del proyecto la puesta en valor de la inversión necesaria para la renovación del sector, estas cifras resultan útiles a la hora de valorar la rentabilidad del proyecto de renovación, en una comparativa contra la descarbonización de otros sectores. A tal efecto, en la Tabla 27, se ofrecen los costes extras totales que supondría la renovación frente al caso base **en donde el sector no realiza ningún esfuerzo descarbonizador (escenario as-is)**, el porcentaje de descarbonización observado y el coste por tonelada abatida.

*Tabla 27. Resultados de rentabilidad descarbonizadora de inversión del escenario actual*

	<i>Reducción de emisiones</i>	<i>Coste por tonelada reducida</i>	<i>Inversión total adicional frente al escenario as-is</i>
LNG	-31,55%	701	+62,72%
Amoniaco	-58,71%	579	+150,04%
Metanol	-19,69%	1.200	+73,75%
Hidrógeno	-100,00%	363	+166,86%

Con los resultados observados, se procede a la construcción de las curvas y gráficas de abatimiento, ilustradas en la Figura 3 y Figura 4.

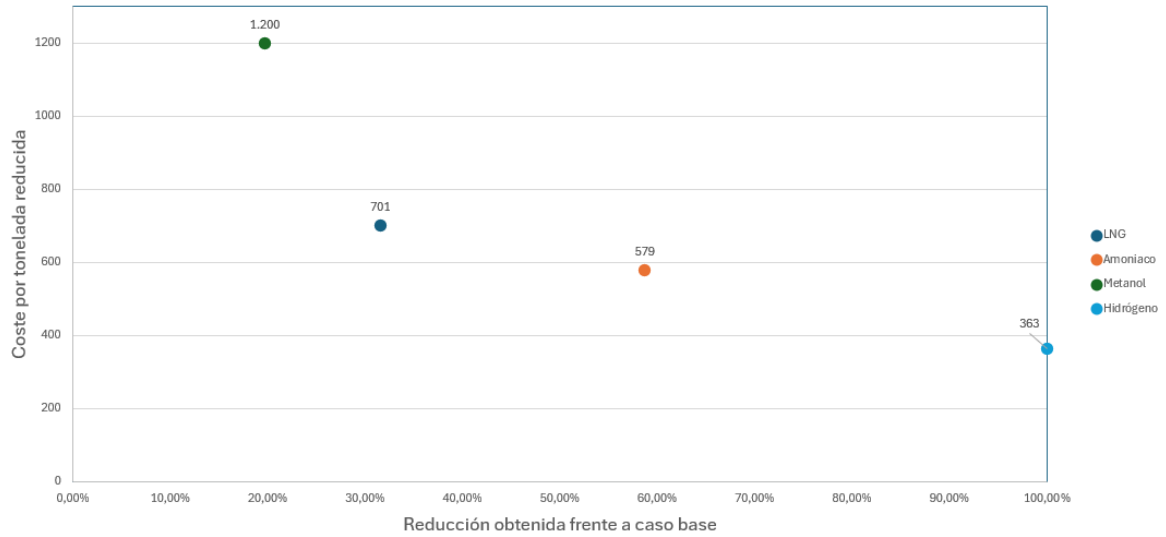


Figura 3, Costes de abatimiento por combustible frente a poder descarbonizador. Escenario actual

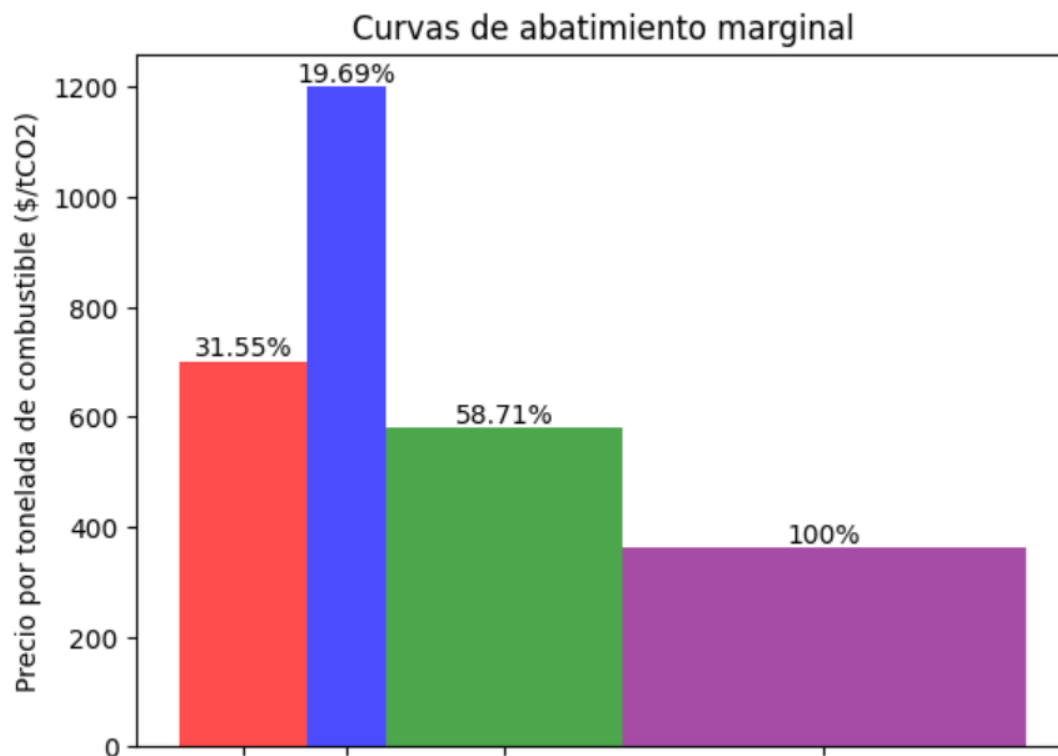


Figura 4. Curva de abatimiento marginal. Escenario actual

## **7.2 ANÁLISIS DE ESCENARIO ACTUAL**

Se denomina escenario actual a aquel escenario inicial para el que se ha desarrollado el modelo. Bajo las condiciones de este escenario, se cumplen las predicciones actuales en cuanto a crecimiento de la economía, implementación gradual de las tasas de emisiones y desarrollo de los costes de combustible.

Se puede observar lo siguiente:

- Los dos combustibles que menor inversión ~~extra~~ suponen son el GNL y el metanol. Sin embargo, no alcanzan un rendimiento relevante en cuanto a descarbonización se refiere. Por ello, se propone su consideración como alternativas transicionales.
- La inversión total requerida para introducir el amoníaco como combustible no es mucho más barata que la requerida para introducir el hidrógeno. Sin embargo, este último se ve favorecido en el análisis unitario por tonelada abatida al presentar casi el doble de poder descarbonizador. Ambas se tratan de las inversiones más costosas.
- Si tomamos la media ponderada de los costes de abatimiento por tonelada como índice del coste real de la descarbonización del sector, obtenemos un **precio promedio por tonelada de \$552,75**.
- Los costes por tonelada reducida en el largo plazo son todos superiores de momento a los precios más caros por tonelada emitida. Por ello, se identifica la tasa por tonelada emitida como una variable crítica en el modelo, y se habrán de llevar a cabo análisis de sensibilidad del modelo frente a ella.
- El metanol obtenido por métodos convencionales resulta un claro perdedor en el análisis comparativo de coste unitario frente al resto de alternativas. Resulta inútil por tanto considerarlo como una alternativa viable al resto de combustibles renovables.

Es por ello que, revisitando el reglamento FuelEU, se decide realizar el mismo análisis con biometanol, alternativa más barata en costes operativos y que en el reglamento FuelEU cuenta con una tasa de emisiones nula. Esto se debe a la consideración de los biocombustibles en general como no emisores, al suponer que

la biomasa desde la cual han sido producidos ha capturado a lo largo de su vida el equivalente de emisiones a las que se producen durante su combustión. En la Tabla 28 se ofrece una comparativa de los precios observados de 2022 a 2024 de metanol frente a biometanol, mientras que en la Tabla 29 se aprecia la reducción de emisiones desglosada por tipo de barco. Los precios utilizados para esta alternativa han sido obtenidos de la misma fuente que los del resto de combustibles, y podrán ser observados anexados a este trabajo.

Tabla 28. Comparativa de precios observados de metanol vs. biometanol ([www.enerdata.net](http://www.enerdata.net))

<i>\$/GJ</i>	<i>2022</i>	<i>2023</i>	<i>2024</i>
Metanol	76,8	73,5	70,3
Biometanol	41,6	38,6	35,6
<i>\$/kWh</i>			
Metanol	2,77	2,65	2,53
Biometanol	1,50	1,39	1,28

Tabla 29. Reducción de las distintas alternativas considerando el biometanol, desglosadas por tipo de barco.

	<i>GNL</i>	<i>Amoniaco</i>	<i>Biometanol</i>	<i>H2</i>
<b>Graneleros</b>	24.53%	11.27%	100%	100%
<b>Portacontenedores</b>	24.53%	11.27%	100%	100%
<b>Carga general</b>	24.53%	11.27%	100%	100%
<b>Tanques</b>	33.27%	21.55%	100%	100%
<b>Otros</b>	33.27%	21.55%	100%	100%
<b>Solo Pasaje</b>	33.27%	21.55%	100%	100%
<b>Ro-Ro/Ro-Pax</b>	24.53%	11.27%	100%	100%
<b>Total</b>	27.37%	14.61%	100%	100%

Tras repetir el análisis tomando en consideración el biometanol en lugar del metanol, manteniendo el resto de variables de entrada del modelo tal y como estaban, se obtienen los resultados desglosados en la Figura 5 y la Figura 6. En la Tabla 30, se puede observar la comparativa de inversión total y el nuevo coste por tonelada reducida del biometanol. **Estos datos serán utilizados como referencia para comparativas en el posterior análisis de sensibilidad.**



Tabla 30. Rentabilidad descarbonizadora revisada. Escenario actual

	<i>Reducción de emisiones</i>	<i>Coste por tonelada reducida</i>	<i>Inversión total adicional frente al escenario as-is</i>
LNG	-31,55%	701	+62,72%
Amoniaco	-58,71%	579	+150,04%
Biometanol	-100,00%	231	+69,76%
Hidrógeno	-100,00%	363	+166,86%

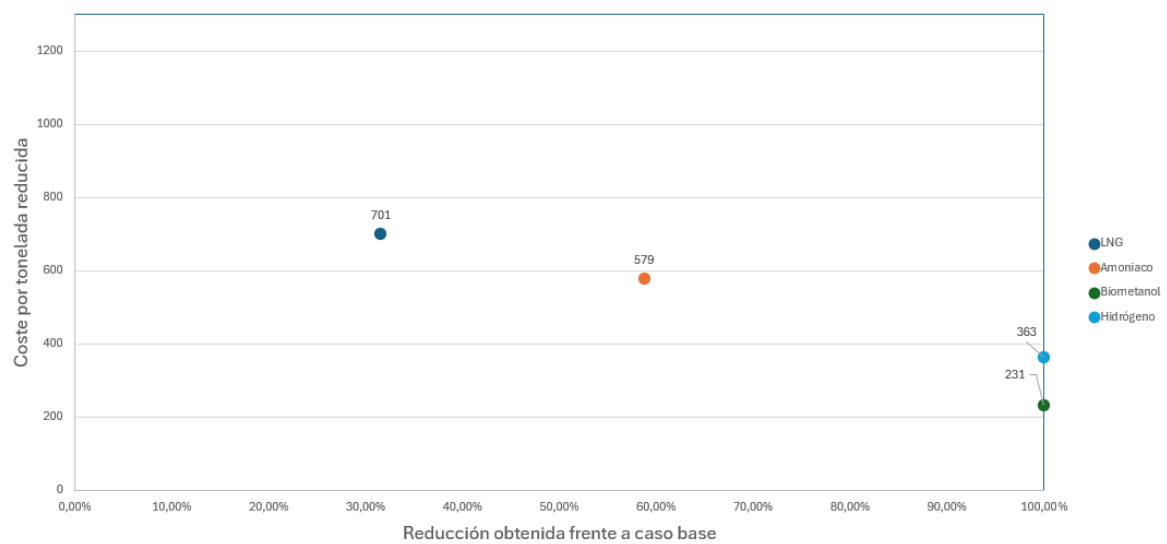


Figura 5. Costes de abatimiento por combustible revisados. Escenario actual

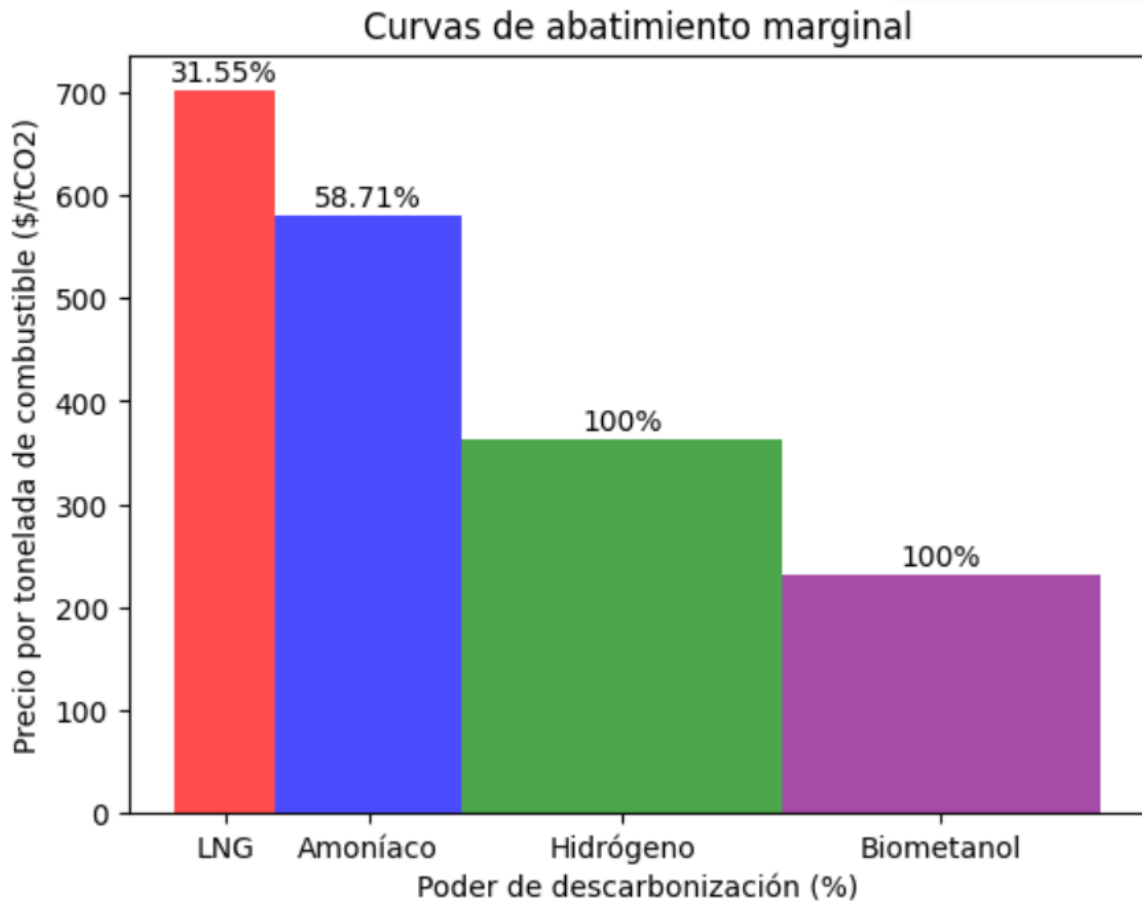


Figura 6. Curvas de abatimiento marginal revisadas. Escenario actual

Tras la sustitución podemos observar que:

- El **precio promedio por tonelada disminuye a \$397,95**, siendo una reducción considerable del 28%.
- En la comparativa revisada, debería evaluarse si el GNL tiene sentido como combustible transicional. Se puede observar como ya no sirve el argumento de ser el que menor inversión inicial requiere y como, en comparación con el resto de alternativas, su reducción de emisiones resulta ahora pobre (27% menos de reducción que la siguiente alternativa)

- El Biometanol se coloca como claro ganador en cuanto a eficiencia descarbonizadora, debido tanto a la consideración que hace el reglamento FuelEU como a sus menores costes de combustible.

Por tanto, en el análisis se deberá considerar tan solo como alternativa viable el biometanol.

### **7.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD FRENTE A TASA DE EMISIONES**

Al haberse determinado como variable crucial en el análisis, se procede al análisis de las consecuencias que suponen los esfuerzos regulatorios europeos de cara al modelo. Para ello, se observarán varios escenarios:

1. Escenario sin tasa de emisiones.
2. Escenario con tasa de emisiones un 50% más agresiva (superior).
3. Escenario actual con exponencialidad de la curva de precio de las emisiones adelantada 10 años.

#### **7.3.1 ESCENARIO SIN TASA DE EMISIONES**

Al eliminarse las tasas de emisiones del modelo, cabe esperar que todas las alternativas se vean penalizadas, al no suponer las emisiones del caso base costes extra. Los resultados obtenidos bajo este supuesto se observan en la Tabla 31 y en las Figuras 7 y 8.

*Tabla 31. Rentabilidad descarbonizadora revisada. Escenario sin tasas de emisiones*

	<i>Reducción de emisiones</i>	<i>Coste por tonelada reducida</i>	<i>Inversión total adicional frente al escenario as-is</i>
LNG	-31,55%	\$ 697	+64,54%
Amoniaco	-58,71%	\$ 578	+152,50%
Biometanol	-100,00%	\$ 231	+72,51%
Hidrógeno	-100,00%	\$ 363	+169,61%

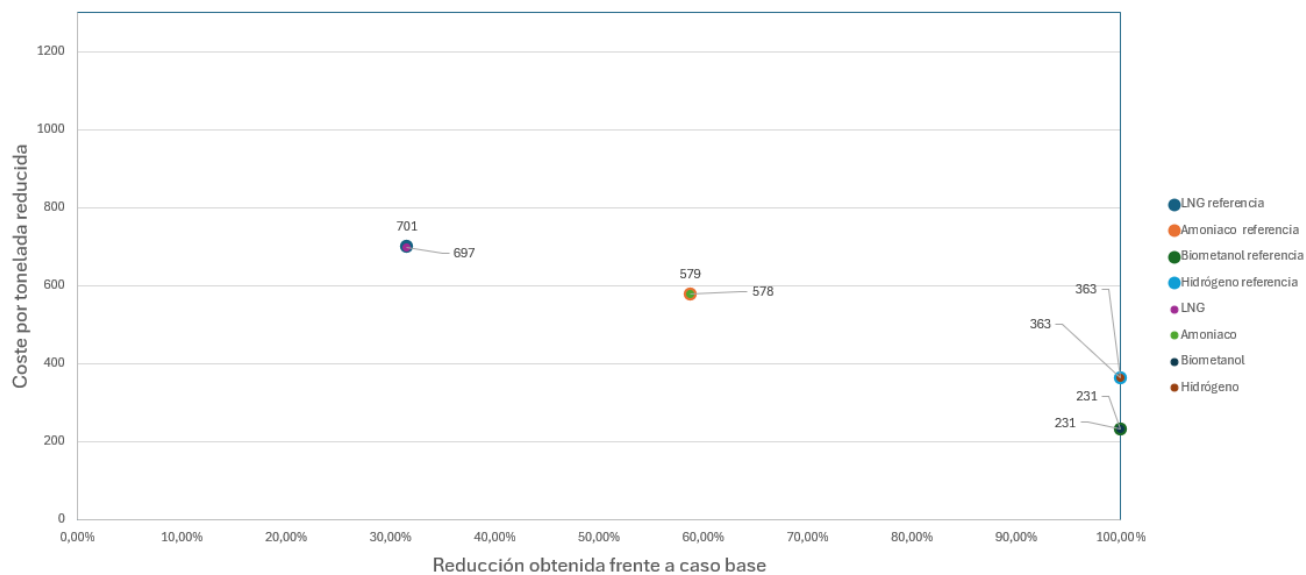


Figura 7. Coste por tonelada abatida del escenario sin tasa de emisiones vs. escenario actual  
Curvas de abatimiento marginal

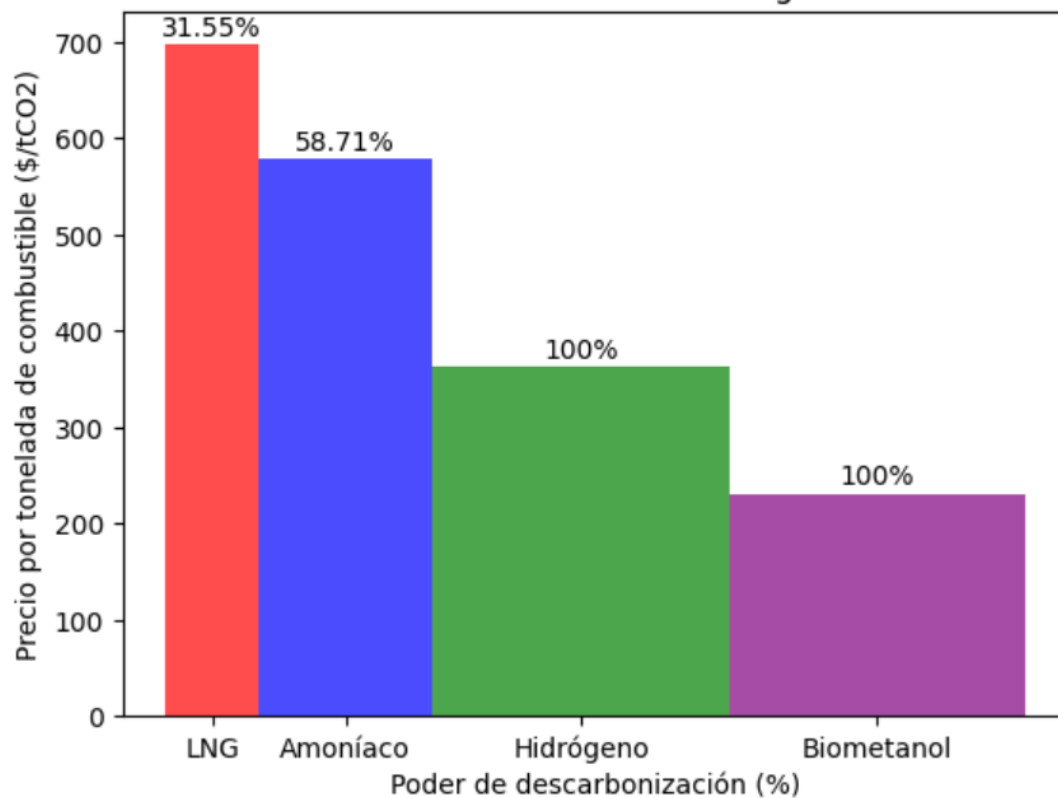


Figura 8. Curvas de abatimiento marginal del escenario sin tasa de emisiones

Tras el análisis comparativo con el escenario actual podemos observar:

- Aumento de los costes de las alternativas frente al caso base, al no verse éste tan penalizado por seguir manteniendo sus emisiones.
- Invariabilidad del coste de las alternativas del hidrógeno y el biometanol, al no verse tampoco afectados en el escenario actual por las emisiones.
- Reducción de costes por tonelada abatida no significativos. De aquí se deduce que el impacto de las tasas de emisiones podría ser mayor y que la recaudación que se haga mediante el mecanismo ETS no supondrá un impacto relevante en el coste del proyecto de descarbonización.
- Si bien tiene sentido realizar un análisis del umbral de sensibilidad de los precios de las emisiones, éste solo será relevante al hacerlo al alza, tras observarse que a la baja los costes no sufren demasiados cambios.

### 7.3.2 ESCENARIO DE TASA DE EMISIONES AGRESIVA

Para realizar un análisis de sensibilidad del modelo frente a subidas de precio de las tasas de emisiones, se propone subir el perfil de precios de las mismas un 50% durante todos los años del modelo. Los resultados obtenidos se pueden ver en la Tabla 32.

*Tabla 32. Resultados de rentabilidad descarbonizadora bajo un escenario de tasa de emisiones agresivo*

	<i>Reducción de emisiones</i>	<i>Coste por tonelada reducida</i>	<i>Inversión total adicional frente al escenario as-is</i>
LNG	-31,55%	703	+61,80%
Amoniaco	-58,71%	579	+148,81%
Biometanol	-100,00%	231	+68,39%
Hidrógeno	-100,00%	363	+165,49%

Al verse los resultados obtenidos muy poco afectados por la subida del 50% en cuanto a las tasas de emisiones (tan solo \$2 para el GNL de encarecimiento por tonelada reducida con respecto al escenario actual) se concluye que:

- Al ser un modelo a largo plazo, los valores inicialmente bajos del perfil de tasas por emisiones de carbono tienen poco peso. Por tanto, es más la temporalidad de la curva la que afecta al impacto de las tasas que su cantidad.

### 7.3.3 ADELANTAMIENTO DEL PERFIL DE TASAS DE EMISIONES 10 AÑOS

Para el análisis del impacto de la temporalidad en el efecto de las tasas sobre el modelo se propone el adelantamiento del perfil 10 años, dejándose los 10 últimos años constantes en el valor de \$300/tCO<sub>2</sub> que consta en el escenario actual. La diferencia de perfiles de precio entre este escenario y el actual se puede observar en la Figura 9.

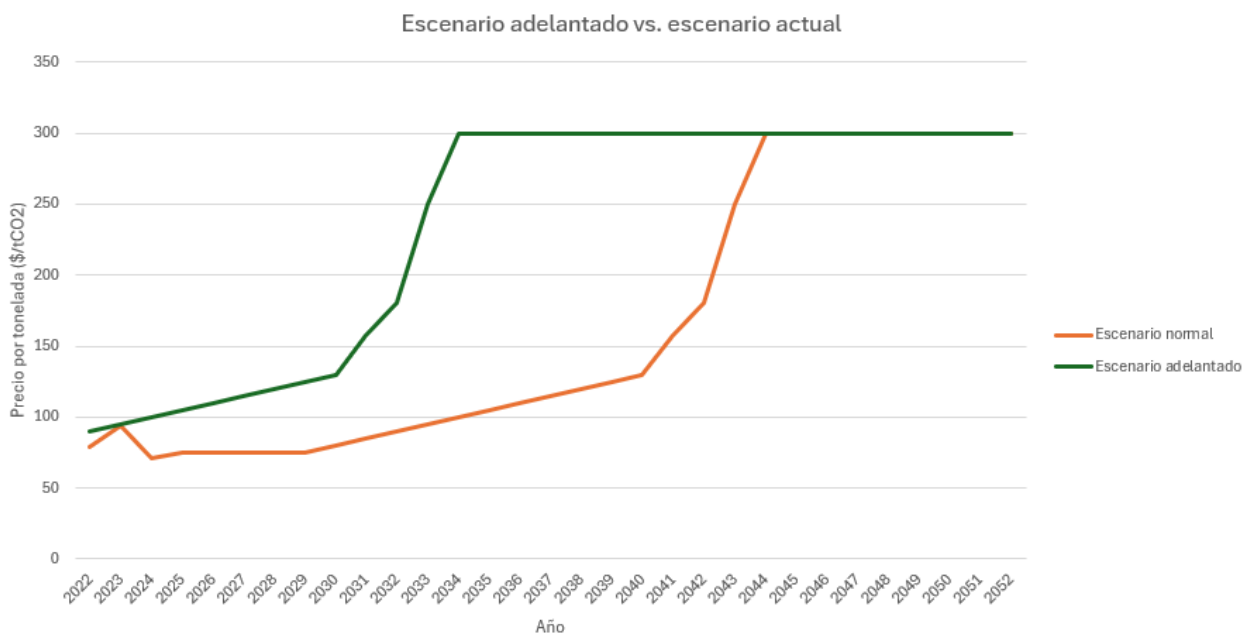


Figura 9. Perfil de precios de emisiones utilizado

Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 33.

*Tabla 33. Resultados de rentabilidad descarbonizadora bajo condiciones de adelantamiento del perfil económico de tasas por emisiones*

	<i>Reducción de emisiones</i>	<i>Coste por tonelada reducida</i>	<i>Inversión total adicional frente al escenario as-is</i>
LNG	-31,55%	704	61,65%
Amoniaco	-58,71%	580	148,62%
Biometanol	-100,00%	231	68,18%
Hidrógeno	-100,00%	363	165,29%

Se observa una reducción de la inversión total necesaria de aquellos combustibles que realmente consiguen descarbonizar el sector, como el biometanol o el hidrógeno, debido a una situación más desfavorable del caso base inicial. Como se puede observar, el cambio sigue sin ser significativo respecto del modelo actual.

Se infiere, por tanto, que la tasa de emisiones no tiene un impacto tan alto a nivel inversión como país en descarbonización.

#### **7.3.4 COMPARATIVA DE IMPACTO DE TASA DE EMISIONES FRENTE A CAPEX**

Con el objeto de establecer conclusiones de cara al sistema de compraventa de emisiones establecido por la UE, se compara la recaudación total debido a tasas de emisiones frente al coste de inversión total durante el alcance del proyecto. Los resultados se ofrecen en la Tabla 34.

Tabla 34. Cifras económicas significativas

(M\$)	CAPEX	Recaudación europea por emisiones (Coste desde el punto de vista de operador de flota)	Recaudación/ CAPEX
<b>Caso Base</b>	7.078.668	53.298,8	0,75%
<b>LNG</b>	14.890.025	36.814,4	0,25%
<b>Amoníaco</b>	15.570.950	22.206,7	0,14%
<b>Metanol</b>	12.265.704	0,00	0,00%
<b>Hidrógeno</b>	22.762.985	0,00	0,00%

## 7.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD FRENTE A PRECIOS DE COMBUSTIBLES

Una vez se ha determinado que el coste del proyecto no es especialmente sensible a la tasa de emisiones, se analizará la sensibilidad del modelo a los precios de los combustibles. Para ello, se contemplarán varios escenarios:

1. Se mantiene la evolución prevista de los combustibles fósiles y se analiza la respuesta del modelo ante el  $\pm 4\%$  previsto de variabilidad de las alternativas.
2. Se mantiene la evolución prevista de los combustibles alternativos y se analiza la respuesta del modelo ante el  $\pm 4\%$  previsto de variabilidad de los combustibles fósiles.

Al haber sido calculados de forma distinta los precios de una alternativa plenamente desarrollada como es el GNL (modelada mediante un cierto crecimiento interanual del precio), con alternativas en vías de desarrollo (modelada mediante predicciones), es necesario realizar ciertos ajustes al modelo para poder realizar una comparativa real. Para ello, y **tan solo para el análisis de la sensibilidad del modelo a los precios de los combustibles**, se modelarán los precios de biometanol, amoníaco e hidrógeno a partir de sus precios en el año 2022. De esta manera, se hallará la tasa anualizada observada en las



predicciones tomadas como punto de partida, y se aplicará anualmente, conociéndose este escenario como escenario inicial de análisis de sensibilidad a precio de combustible.

Para la obtención de las tasas anualizadas, se aplica la fórmula estándar de tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR, por sus siglas en inglés).

$$CAGR = \left( \frac{\text{Valor Final}}{\text{Valor Inicial}} \right)^{1/n} - 1$$

De este cálculo se obtienen los datos reflejados en la Tabla 35 para el análisis de sensibilidad de precios de combustible de biometanol, amoníaco e hidrógeno:

*Tabla 35. Tasas anualizadas de crecimiento de precio de combustibles bajo el escenario inicial de análisis de sensibilidad del modelo al precio del combustible*

	<i>Precio inicial (\$/kWh)</i>	<i>Tasa anualizada de crecimiento de precio</i>
<b>Amoníaco</b>	2,20	-3,58%
<b>Biometanol</b>	1,50	-1,89%
<b>Hidrógeno</b>	1,28	-3,13%

Los datos del escenario inicial de análisis se presentan en la Tabla 36.

*Tabla 36. Escenario inicial de análisis de sensibilidad al precio del combustible*

	<i>Reducción de emisiones</i>	<i>Coste por tonelada reducida (\$)</i>	<i>Inversión total adicional frente al escenario as-is</i>
LNG	-31,55%	701	+62,72%
Amoniaco	-58,71%	583	+151,88%
Biometanol	-100,00%	234	+71,84%
Hidrógeno	-100,00%	361	+165,42%

Con estos datos de partida, se procede a hacer el análisis de sensibilidad del modelo frente a costes de combustibles.

### 7.4.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD FRENTE AL PRECIO DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

Tras aplicarle al escenario inicial de análisis factores correctores interanuales de  $\pm 4\%$ , se obtienen los resultados desglosados en la Tabla 37.

Tabla 37. Sensibilidad porcentual frente a variaciones del precio de los combustibles

Precio por tonelada abatida	Escenario inicial de análisis	Variación +4%	Variación -4%
LNG	701,32	<b>3,40%</b>	<b>-1,58%</b>
Amoníaco	583,42	<b>9,08%</b>	<b>-5,10%</b>
Biometanol	233,69	<b>13,38%</b>	<b>-7,22%</b>
Hidrógeno	360,95	<b>5,91%</b>	<b>-3,28%</b>
<i>Inversión total necesaria frente al caso base (M\$)</i>	<i>Escenario inicial de análisis</i>	<i>Variación +4%</i>	<i>Variación -4%</i>
LNG	113.974,83	<b>8,83%</b>	<b>-4,11%</b>
Amoníaco	276.000,82	<b>15,05%</b>	<b>-2,42%</b>
Biometanol	130.544,92	<b>32,01%</b>	<b>-5,10%</b>
Hidrógeno	300.609,95	<b>9,48%</b>	<b>0,80%</b>

La variación en el precio por tonelada abatida se puede observar gráficamente en la Figura 10.



Figura 10. Análisis de sensibilidad por tonelada frente a precios de combustibles alternativos

## 7.4.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD FRENTE A PRECIOS DE COMBUSTIBLES FÓSILES ACTUALES

De cara al análisis de sensibilidad, resulta crucial saber también como resulta la comparativa con el caso base si este varía. De la misma manera que se hizo al analizar el efecto de la tasa de emisiones en el modelo, un caso base favorecido o desfavorecido, afecta a la rentabilidad económica de las alternativas por comparación.

Partiendo del mismo escenario inicial de análisis que en el apartado 8.4.1, se procederá a evaluar la variación de los resultados si los combustibles fósiles observados (HFO y MGO) sufren variaciones interanuales un 4% mayores y menores, respectivamente.

En este supuesto, no tiene sentido analizar el coste por tonelada reducida, puesto que, al mantenerse el número de las mismas exactamente igual, y no haberse modificado los precios de inversión relacionados a los combustibles, no varían.

Los resultados obtenidos en cuanto a coste extra de inversión de las alternativas, con respecto al caso base variado, se pueden observar en la Tabla 38.

Tabla 38. Análisis de rendimiento de las alternativas frente a cambios de precio de combustible en el caso base

<i>Inversión total necesaria frente al caso base (M)</i>	<i>Escenario inicial de análisis</i>	<i>Variación +4%</i>	<i>Variación -4%</i>
LNG	113.974,83	<b>-11,49%</b>	<b>5,35%</b>
Amoníaco	276.000,82	<b>-4,74%</b>	<b>2,21%</b>
Biometanol	130.544,92	<b>-10,03%</b>	<b>4,67%</b>
Hidrógeno	300.609,95	<b>-2,68%</b>	<b>8,43%</b>

### **7.4.3 OBSERVACIONES**

En cuanto al análisis de sensibilidad del modelo frente a los precios de los distintos combustibles se observa que:

- El modelo presenta mayor sensibilidad al coste del combustible integrado en el OPEX que a la tasa de emisiones, al ser mayor el precio que se paga por el combustible necesario para generar una tonelada de emisiones, que el precio al que se paga la emisión de la misma.
- El modelo presenta mayor sensibilidad a cambios desfavorables a las alternativas que a cambios favorables a las mismas.
- Pese a ser relevante en el coste del proyecto de descarbonización, el precio de los combustibles no es el factor determinante que más contribuye al coste de la inversión. Por descarte, el factor determinante será el CAPEX, al suponer el mayor desembolso por tratarse de una industria intensiva en cuanto a capital.

## ***7.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD FRENTE A TASA DE RENOVACIÓN Y COMPARATIVA OPEX-CAPEX***

Tal y como se observa en los apartados anteriores de este capítulo, resulta una inversión altamente dependiente del CAPEX. El hecho de que ni el precio de las emisiones de GEI ni el de los combustibles alteren de manera significativa las curvas de abatimiento implican que el grueso de la inversión está en el CAPEX.

La hipótesis planteada para dar explicación a este fenómeno tiene que ver con la tasa de renovación. Al no haber contemplado una reducción paulatina del precio de los barcos conforme se va desarrollando la tecnología y sus medios de fabricación, el precio de compra de un barco resulta elevado durante todo el alcance temporal del proyecto. Por otro lado, las tasas de renovación utilizadas, aunque completamente necesarias para no tratar con una flota envejecida, son relevantes. Además, el hecho de renovar la flota de golpe en el año 0 del proyecto conlleva unos costes con un mayor impacto en los valores actuales netos, al estar más cerca del momento presente.

Por tanto, se realizarán dos análisis alternativos, con el objeto de cuantificar la sensibilidad del modelo a la tasa de renovación, y de analizar el peso relativo de la inversión inicial versus los costes operativos a los que se enfrentarían los operadores.

### 7.5.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD. ESCENARIO ACTUAL SIN TASA DE RENOVACIÓN

En la Tabla 39 y la Figura 11 se observan las reducciones de CAPEX al eliminar la tasa de renovación del modelo.

Tabla 39. CAPEX debido a la tasa de renovación

<i>% sobre el CAPEX del escenario as-is</i>	<i>Sin tasa de renovación</i>	<i>Escenario normal con tasa de renovación</i>
LNG	97%	110%
Amoniaco	107%	120%
Metanol	60%	73%
Hidrógeno	209%	222%

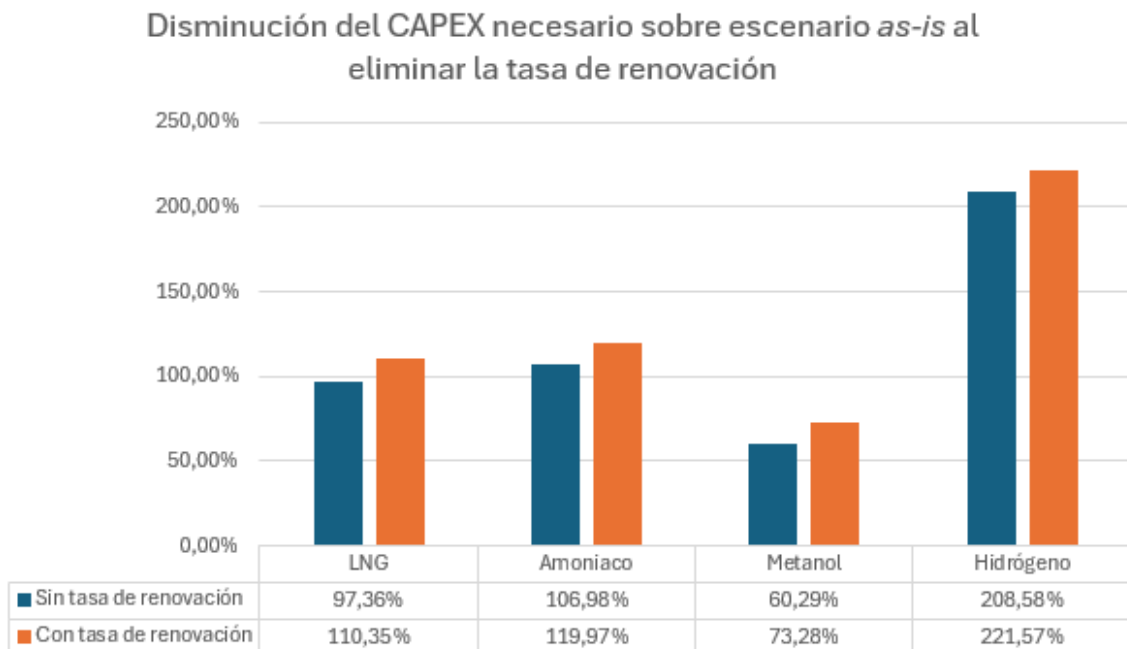


Figura 11. Disminución del CAPEX necesario sobre el escenario *as-is* al eliminar la tasa de renovación

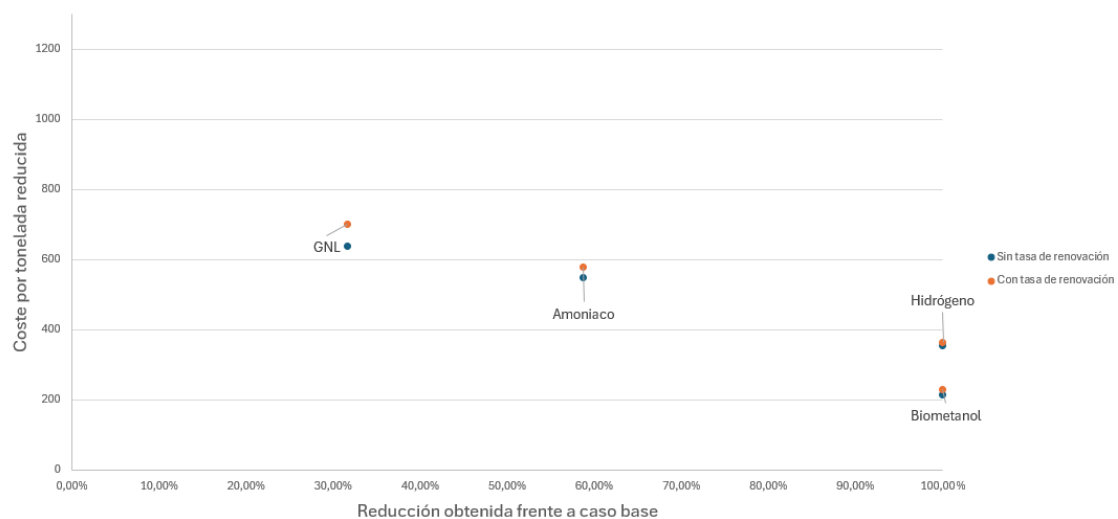
Los precios por tonelada abatida disminuirían, así como la inversión extra necesaria con respecto del caso base, como se puede observar en la Tabla 40.

*Tabla 40. Rentabilidad del abatimiento sin tasa de renovación*

<i>Costes por tonelada reducida</i>	<i>GNL</i>	<i>Amoniaco</i>	<i>Biometanol</i>	<i>Hidrógeno</i>
<b>\$/ton</b>	637,45	549,09	213,53	355,19
<b>Inversión extra en España sobre escenario as-is</b>	<b>-3,39%</b>	<b>+85,77%</b>	<b>+5,73%</b>	<b>+109,89%</b>

Cabe resaltar que, al eliminar la tasa de renovación, el GNL sale más barato que el continuar la flota tal y como está actualmente, debido al efecto de las renovaciones, y que el biometanol no supone un desembolso excesivo sobre el escenario *as-is*, pese a verse penalizada la disminución de CAPEX por un incremento de los precios del combustible. Se deja propuesto para futuros trabajos como afecta la alternativa de la renovación de flota mediante retrofitting a las inversiones necesarias para estos dos tipos de combustible.

Con los datos obtenidos al eliminar la tasa de renovación, se obtendría el siguiente análisis comparativo frente al escenario actual, mostrado en la Figura 12.



*Figura 12. Reducción en el precio por tonelada al eliminar la tasa de renovación frente al caso base*



Como se puede observar, es el primero de los análisis de sensibilidades que comienza a tener un impacto mayor en el precio por tonelada abatida.

### **7.5.2 ANÁLISIS UNITARIO POR BARCO DEL ESCENARIO ACTUAL INICIAL. COMPARATIVA INVERSIÓN EN RENOVACIÓN VS. COSTES OPERATIVOS**

De cara a tener cifras representativas del ahorro de costes operativos que conlleva la gran inversión inicial, se propone el análisis de sensibilidad desde el punto de vista de un operador de navío. Por ello, se modelará con la herramienta desarrollada el coste unitario de la renovación de cada tipo de barco, sin tasa de renovación y suponiendo una vida útil en todos los tipos de barco de 30 años.

En la Tabla 41 se muestran los resultados del VAN de la inversión total, suponiendo una compra de un único barco en el año 2022, así como la relación entre el coste operativo durante los 30 años de alcance y la inversión inicial.

*Tabla 41. Resultados en VAN de la inversión y comparativa OPEX/CAPEX*

<b>VAN (M\$)</b>	<b>GNL</b>	<b>OPEX/ CAPEX</b>	<b>Amoniaco</b>	<b>OPEX/ CAPEX</b>	<b>Biometanol</b>	<b>OPEX/ CAPEX</b>	<b>Hidrógeno</b>	<b>OPEX/ CAPEX</b>
Granelero	<b>123,07</b>	2,56%	<b>223,18</b>	53,07%	<b>153,78</b>	60,2%	<b>241,08</b>	25,56%
Porta-contenedor	<b>122,45</b>	2,04%	<b>214,20</b>	46,92%	<b>146,96</b>	53,1%	<b>235,28</b>	22,54%
Carga general	<b>60,78</b>	1,30%	<b>152,43</b>	17,25%	<b>64,19</b>	33,7%	<b>109,75</b>	14,32%
Tanque	<b>81,86</b>	2,33%	<b>171,92</b>	43,26%	<b>102,73</b>	60,5%	<b>160,89</b>	25,70%
Otros	<b>50,04</b>	0,08%	<b>61,12</b>	1,87%	<b>40,76</b>	1,9%	<b>80,65</b>	0,81%
Solo Pasaje	<b>60,14</b>	0,23%	<b>63,78</b>	6,29%	<b>50,82</b>	5,9%	<b>98,39</b>	2,49%
Ro-Ro/Ro-Pax	<b>90,34</b>	0,37%	<b>78,51</b>	12,16%	<b>78,35</b>	8,8%	<b>149,39</b>	3,74%

## 7.6 COMPARATIVA DE FLOTA MODELO VS. FLOTA ESPAÑOLA

Al no contar con los datos de repostaje de los barcos de cabotaje (con bandera española) atracados en España en el año 2022, se ha establecido desde un marco teórico una flota modelo que se equipará con el transporte marítimo en España.

De cara a sacar conclusiones más precisas sobre el estado del sector actualmente en España, se tomarán de los informes de Puertos del Estado los datos de los barcos nacionales y se establecerá una aproximación que permita analizar su conjunto utilizando el mismo método de coeficientes de aplicación diseñado para la elaboración de la flota modelo.

En la Tabla 42 se ofrece una comparativa entre la composición de ambas flotas, la española observada y la modelo utilizada en el trabajo.

Tabla 42. Flota modelo vs. flota de bandera española

	<b>TOTAL barcos</b>	<b>Coficiente de la flota española</b>	<b>Coficiente de la flota modelo</b>	<b>Flota española / Flota modelo</b>
Graneleros	<b>99</b>	<b>2,15%</b>	7,41%	29%
Portacontenedores	<b>44</b>	<b>0,41%</b>	2,79%	15%
Carga general	<b>196</b>	<b>4,01%</b>	4,23%	95%
Tanques	<b>282</b>	<b>2,78%</b>	9,40%	30%
Otros	<b>479</b>	<b>1,86%</b>	0,20%	945%
Solo Pasaje	<b>870</b>	<b>2,84%</b>	0,14%	2025%
Ro-Ro	<b>3875</b>	<b>8,83%</b>	0,33%	2640%
<b>Total sobre número de barcos que repostan en España</b>		<b>4,47%</b>	<b>1,56%</b>	

En la Tabla 43, se ofrece una comparativa de las emisiones producidas en el año 2022 entre la flota modelo y la flota de bandera española.

*Tabla 43. Comparativa de emisiones entre flota modelo y flota de bandera española*

<i>Emisiones caso base año 2022</i>	<i>Flota española</i>	<i>Flota modelo</i>
Graneleros	92.880,85	320.832,07
Portacontenedores	17.759,80	247.348,75
Carga general	173.324,98	54.367,14
Tanques	120.168,94	678.986,70
Otros	80.296,04	709,68
Solo Pasaje	123.044,80	2.221,86
Ro-Ro	382.142,17	15.130,60
Total emisiones 2022	989.617,60	1.319.596,83

Como se puede observar, la flota española resulta aproximadamente 3 veces superior en número a la flota modelo, y su composición es completamente distinta. Algunas observaciones:

- La flota de bandera española observada está compuesta en su gran mayoría por barcos de menor tamaño. Los grandes buques como portacontenedores son en su mayoría de bandera extranjera en nuestro país.
- De la misma manera, los buques de tipo Ro-Ro se encuentran sobrerrepresentados en España.
- La flota modelo observada emite un 33% más de toneladas de GEI, pese a ser 3 veces más pequeña. Esto es debido también a la composición de la flota.

Al observarse tal diferencia en la composición de la flota, se obtienen los costes por tonelada abatida de la renovación de los buques con bandera española, desglosada en la Tabla 44.

*Tabla 44. Comparativa de precios por tonelada abatida*

<i>\$/tCO2 abatida</i>	<i>Flota modelo</i>	<i>Flota española</i>	<i>Variación</i>
LNG	701,00	888,36	+27%
Amoniaco	579,00	822,55	+42%
Biometanol	231,00	424,55	+84%
Hidrógeno	363,00	703,77	+94%

Se puede observar cómo, debido a que la flota española está compuesta por un mayor número de barcos pequeños, y debido a que la renovación del sector resulta tan dependiente del CAPEX, a igualdad de toneladas abatidas, un mayor número de barcos encarece en gran medida la renovación.

Debido al método de estimación mediante coeficientes de inversión utilizado para obtener ambas flotas sobre el total de buques observados, los datos de OPEX/CAPEX no varían con cada flota. Sin embargo, la comparativa de ambos datos entre flotas, desglosada en la Tabla 45, resulta de utilidad. En ella, se observa como pese a tener un coste de operación un 37% menor, necesitaría de un 29% más de inversión en buques para la descarbonización.

*Tabla 45. Comparativa de OPEX y CAPEX*

<i>OPEX flota española / OPEX flota modelo</i>	<i>CAPEX flota española / CAPEX flota modelo</i>
63%	129%

## Capítulo 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El presente capítulo pretende analizar las **conclusiones principales** obtenidas como fruto del estudio:

- Los combustibles alternativos estudiados ofrecen una reducción significativa de emisiones, en un rango entre el 30 y el 100% de reducción. Por tanto, son técnicamente viables y efectivos. Su utilidad futura radicará por tanto en la facilidad y en su coste de implantación, motivos por los cuales análisis como el presente trabajo y modelo cobran relevancia.
- Debido a las consideraciones realizadas por la Unión Europea en el reglamento FuelEU, carece de sentido considerar al metanol como una alternativa viable para la descarbonización del transporte marítimo existiendo el biometanol como alternativa. Esto se debe principalmente a sus precios elevados en comparación con la alternativa obtenida a partir de biomasa, y a que se considera que en el proceso de producción de biometanol se capturan las emisiones producidas en su posterior combustión.
- Las curvas de abatimiento marginal muestran que, debido a su potencial de reducción del 100%, y a su precio relativo a los otros combustibles propuestos, el biometanol y el hidrógeno han de ser considerados en la actualidad no ya como alternativas de transición hacia el objetivo de emisiones 0, sino como alternativas definitivas para la descarbonización del sector.
- El principal problema al que se enfrenta la renovación del sector radica en los elevados costes de inversión inicial en barcos nuevos, que hacen que, pese a la inclusión de las emisiones de los buques en el sistema *cap-and-trade* ETS, siga sin salir rentable desde un punto de vista de un operador de flota la renovación de la totalidad de la flota. Ni una fluctuación de los precios de los combustibles, ni del precio de la tonelada de CO<sub>2</sub> emitida son capaces de paliar sustancialmente el enorme gasto que supone la inversión inicial.

- Pese a buscar la financiación de dichas inversiones iniciales mediante la recaudación del sistema ETS, el impacto que dicha financiación supone en el CAPEX del proyecto no se puede considerar significativo.
- Debido a la magnitud del CAPEX, la composición de la flota que se desee renovar tiene un gran impacto en el coste total, y por ende, en el precio de abatimiento por tonelada. Este es el caso de la flota de bandera española, que debido a estar compuesta en su gran mayoría por barcos de menor tamaño, ha de invertir una mayor cantidad para paliar emisiones.

En cuanto a los **Objetivos de Desarrollo Sostenible** mencionados en el apartado 1.1.3, se consiguen avances en todos ellos de la siguiente manera:

- **7. Energía asequible y no contaminante**

El modelo desarrollado contribuye a la elección de las alternativas de combustible más apropiadas para conseguir una transición energética viable hacia combustibles no contaminantes. Supone una herramienta para la toma de decisiones estratégicas sobre la viabilidad de las distintas alternativas de descarbonización.

- **9. Industria, innovación e infraestructura**

El modelo contribuye al desarrollo de un sector crítico en la infraestructura de un país como son el transporte y el comercio por vía marítima. La innovación en este tipo de sectores, tan crítica como sensible, ha de ser realizada mediante un cuidadoso análisis de las distintas alternativas, análisis que se ve facilitado gracias al modelo desarrollado.

- **13. Acción por el clima**

Para conseguir en un futuro un panorama marítimo que contribuya al cuidado del clima mediante la eliminación de GEI, se necesitan alternativas viables económicamente y estrategias y políticas que contribuyan a facilitar dicho objetivo. Este modelo constituye una herramienta de toma de decisiones para la elaboración de dichas estrategias.

Se proponen además los **siguientes proyectos futuros** para seguir desarrollando las conclusiones obtenidas en el presente estudio:

- Análisis de descarbonización de alternativas en el sector, desde una perspectiva *Well-to-Tank*. Utilizando una perspectiva complementaria a la desarrollada en el presente trabajo, sería necesario evaluar los costes de infraestructura necesarios para poder llevar a cabo la descarbonización del sector.
- Análisis unitario por tipo de barco de la flota española.
- Análisis de los factores a tomar en consideración para el establecimiento de una tasa de emisiones.
- Revisión y actualización de las políticas europeas a desarrollar para facilitar la transición energética en el sector de transporte marítimo.
- Actualización y revisión del modelo desarrollado para incluir metodologías como el *retrofitting* en barcos existentes.
- Estudio detallado de la flota española y de las estrategias de inversión a seguir en un horizonte temporal de 30 años.
- Plan de negocio de implantación progresiva de las alternativas propuestas en este estudio, con evaluación y contraste de conclusiones.

## Capítulo 9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. E. p. l. T. Ecológica, «Borrador 2023 para la actualización del PNIEC 2023-2030,» Gobierno de España, Madrid, 2023.
- [2] Ministerio español de Transición Ecológica, «Hoja de Ruta del Hidrógeno: Una apuesta por el hidrógeno renovable,» Gobierno de España, Madrid, 2023.
- [3] Organización de las Naciones Unidas, «Objetivos y metas de desarrollo sostenible,» Nueva York, 2015.
- [4] J. Saul, «Transporte marítimo se prepara para negociaciones por polución tras negociaciones en París,» *Reuters*, 2015.
- [5] UNCTAD, «Review of Maritime Transport 2023,» 2023.
- [6] IMO, «Marine Environment,» 2023.
- [7] International Maritime Organization, «Initial IMO Strategy for Reducing Shipping Emissions set for Adoption,» *United Nations Climate Change*, 2018.
- [8] OMI, «ESTRATEGIA DE 2023 DE LA OMI SOBRE LA REDUCCIÓN DE LAS,» Organización Marítima Internacional, 2023.
- [9] RINA, «From Today to 2050: Challenges and Opportunities for the Maritime Industry,» RINA, Roma, 2023.



- [10] E. Morante, «Roadmap to decarbonize the shipping sector: Technology development, consistent policies and investment in research, development and innovation,» *UNCTAD Transport and Trade Facilitation Newsletter*, 19 Diciembre 2022.
- [11] Comisión Europea, «REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC,» Comisión Europea, Bruselas, 2021.
- [12] Council for the European Union, «Fit for 55,» Concilium, Bruselas, 2021.
- [13] Maersk Mc-Kinney Molley Center for Zero Carbon Shipping, «Assessing impacts of EU and US policies on accelerated deployment of alternative maritime fuels,» Maersk Mc-Kinney Molley Center for Zero Carbon Shipping, Copenhagen, 2024.
- [14] Comisión Europea, «Innovation Fund: Deploying innovative net-zero technologies for climate neutrality.,» Bruselas, 2023.
- [15] DNV, «Plataforma Alternative Fuels Insight,» DNV, -, 2024.
- [16] Iberdrola, «¿Qué es el amoníaco verde y cómo se produce?,» Iberdrola, Madrid, 2022.
- [17] B. C. P. Y. Z. N. C. P. Nikita Pavlenko, «The climate implications of using LNG as marine fuel,» *Working paper from International Council on Clean Transportation (ICCT)*, 2020.
- [18] L. S., L. B., P. H., L. E. y E. S., «Marginal abatement cost curves (MACCs) for assessing the role of market based measures (MBMs) in enhancing the adoption of alternative marine fuels,» *Nature*, 2023.
- [19] EMSA - European Maritime Safety Agency, «THETIS,» Brussels, 2022.

- [20] Puertos del Estado, «Estadísticas mensuales de los puertos del Estado,» [En línea]. Available: [https://www.puertos.es/es-es/estadisticas/Paginas/estadistica\\_mensual.aspx](https://www.puertos.es/es-es/estadisticas/Paginas/estadistica_mensual.aspx).
- [21] N. Pavlenko, B. Comer, Y. Zhou, N. Clark y D. Rutherford, «The climate implications of using LNG as a marine fuel,» International Council on Clean Transportation, 2020.
- [22] Observatorio de los servicios portuarios, «ESTUDIO DE LAS NECESIDADES E IMPLICACIONES DE LA DETERMINACIÓN DEL SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE A BUQUES COMO SERVICIO PORTUARIO CONFORME A LO ESTABLECIDO EN EL REGLAMENTO UE 2017/352,» SBC, Madrid, 2020.
- [23] J. Faber, A. Markowska, D. Nelissen, M. Davidson y V. Eyring, «Technical support for European action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international maritime transport,» Delft Faculty of Science. Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics, 2009.
- [24] Maersk Mc-Kinney Moller Center Observatory for Zero carbon shipping, «Fuel Cost Calculator,» 2024.
- [25] United Nations Council for Trade and Development, «Review of Maritime Transport 2022. Chapter 2,» United Nations, N.Y, 2022.
- [26] ONG Shipbreaking Platform, «Annual List of Scrapped Ships,» NGO Shipbreaking Platform, 2022.
- [27] P. Same, N. B. Clausen, C. Chryssakis y P. R. Kristensen, «DNV-GL and MAN Diesel & Turbo joint study - Cost and benefits of using alternative fuels,» DNV & Man Diesel and Turbo Joint Study, 2020.
- [28] R. Madsen, L. Klebanoff, S. Caughlan, J. Pratt, T. Leach, T. Appelgate, S. Kelety, H.-C. Wintervoll, G. Haugom, A. Teo y S. Ghosh, «Feasibility of the Zero-V: A zero-

emissions hydrogen fuel-cell coastal research vessel,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, n° 46, pp. 25328-25343, 2020.

[29] AVEX Nav, «Bulk Carrier Cost: How Much Does It Cost to Buy and Operate a Bulk Carrier?,» AVEX, [En línea]. Available: <https://avexnav.com/bulk-carrier-cost/>.

[30] J. A. Ryste, M. Wold y T. Sverud, «Comparison of Alternative Marine Fuels,» DNV GL AS Maritime, Hovk, Noruega, 2019.

[31] [www.enerdata.net](http://www.enerdata.net), «Carbon price forecast under the EU ETS,» Enerdata, -, 2024.

## **ANEXO I**

THETIS

DESGLOSE POR TIPO DE BARCO Y PUERTO Y COMBUSTIBLE DE CONSUMO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS

NECESIDADES ENERGÉTICAS DE COMBUSTIBLE (kWh<sub>t</sub>) Y (kWh<sub>m</sub>)  
DESGLOSADAS POR COMBUSTIBLE, PUERTO Y TIPO DE BARCO

EXCEL ESCENARIOS. EMISIONES POR BARCO Y PUERTO EN LA SUSTITUCIÓN COMPLETA DE CADA UNA DE LAS ALTERNATIVAS

PRECIOS DE LOS COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS CONSIDERADOS

ESCENARIOS ECONÓMICOS PARA CADA UNO DE LOS COMBUSTIBLES

## Resumen de datos obtenidos del portal europeo THETIS

	<i>Recuento de barcos</i>	<i>Representación del tipo de barco sobre el total</i>	<i>Suma total de consumo de fuel [toneladas]</i>	<i>Consumo promedio anual (toneladas por barco)</i>	<i>Porcentaje de consumo sobre el total</i>	<i>Suma total de emisiones de CO<sub>2</sub> [toneladas]</i>	<i>Porcentaje de emisiones sobre el total</i>
Bulk carrier	4.141	31,45%	6.013.161	1.452	13,63%	18.897.191	13,80%
Chemical tanker	1.433	10,88%	2.812.928	1.963	6,38%	8.856.168	6,47%
Combination carrier	9	0,07%	14.857	1.651	0,03%	46.604	0,03%
Container ship	1.857	14,10%	12.325.549	6.637	27,95%	38.190.673	27,89%
Container/ro-ro cargo ship	60	0,46%	337.072	5.618	0,76%	1.055.062	0,77%
Gas carrier	355	2,70%	897.839	2.529	2,04%	2.790.594	2,04%
General cargo ship	1.226	9,31%	1.787.361	1.458	4,05%	5.637.762	4,12%
LNG carrier	392	2,98%	3.762.968	9.599	8,53%	10.820.301	7,90%
Oil tanker	2.001	15,20%	5.373.244	2.685	12,18%	16.892.203	12,33%
Other ship types	249	1,89%	502.409	2.018	1,14%	1.576.982	1,15%
Passenger ship	188	1,43%	2.198.928	11.696	4,99%	6.925.293	5,06%
Refrigerated cargo carrier	145	1,10%	384.434	2.651	0,87%	1.202.028	0,88%
Ro-pax ship	413	3,14%	4.503.179	10.904	10,21%	14.117.896	10,31%
Ro-ro ship	228	1,73%	1.781.347	7.813	4,04%	5.569.058	4,07%
Vehicle carrier	470	3,57%	1.409.480	2.999	3,20%	4.377.917	3,20%
<b>Total general</b>	<b>13.167</b>	<b>100,00%</b>	<b>44.104.757</b>		<b>100,00%</b>	<b>136.955.732</b>	<b>100,00%</b>

**Desglose por barco, puerto y combustible del consumo en toneladas**

	<i>HFO Bahía de Algeciras</i>	<i>HFO Valencia</i>	<i>HFO Barcelona</i>	<i>HFO Cartagena</i>	<i>HFO Bilbao</i>	<i>HFO Huelva</i>	<i>HFO Tarragona</i>	<i>HFO Las Palmas</i>	<i>HFO Baleares</i>	<i>MGO Bahía de Algeciras</i>	<i>MGO Valencia</i>	<i>MGO Barcelona</i>	<i>MGO Cartagena</i>	<i>MGO Bilbao</i>	<i>MGO Huelva</i>	<i>MGO Tarragona</i>	<i>MGO Las Palmas</i>	<i>MGO Baleares</i>	<i>GNL Bahía de Algeciras</i>	<i>GNL Valencia</i>	<i>GNL Barcelona</i>	<i>GNL Cartagena</i>	<i>GNL Bilbao</i>	<i>GNL Huelva</i>	<i>GNL Tarragona</i>	<i>GNL Las Palmas</i>	<i>GNL Baleares</i>
<b>Graneleros</b>	520.326	43.322	203.564	5.917	9.385	21.418	7.175	263.413	245	64.310	7.620	35.808	1.041	599	2.647	1.262	90.912	43	0	0	144	4	6	0	0	213	0
<b>Porta-contenedores</b>	1.066.545	88.800	417.258	12.128	19.236	43.903	14.707	539.934	501	131.820	15.620	73.397	2.133	1.228	5.426	2.587	186.347	88	0	0	295	9	12	0	0	436	0
<b>Carga general</b>	154.662	12.877	60.508	1.759	2.790	6.366	2.133	78.297	73	19.116	2.265	10.643	309	178	787	375	27.023	13	0	0	43	1	2	0	0	63	0
<b>Tanques</b>	868.351	72.298	339.720	9.874	15.662	35.744	11.974	439.599	408	107.324	12.717	59.758	1.737	1.000	4.418	2.106	151.719	72	0	0	240	7	10	0	0	355	0
<b>Otros</b>	43.474	3.620	17.008	494	784	1.790	599	22.009	20	5.373	637	2.992	87	50	221	105	7.596	4	0	0	12	0	1	0	0	18	0
<b>Solo Pasaje</b>	190.276	15.842	74.440	2.164	3.432	7.832	2.624	96.326	89	23.517	2.787	13.094	381	219	968	462	33.245	16	0	0	53	2	2	0	0	78	0
<b>Ro-Ro/Ro-Pax</b>	543.850	45.281	212.767	6.184	9.809	22.387	7.499	275.322	256	67.217	7.965	37.426	1.088	626	2.767	1.319	95.022	45	0	0	150	4	6	0	0	222	0
<b>Total</b>	<b>3.387.483</b>	<b>282.039</b>	<b>1.325.264</b>	<b>38.521</b>	<b>61.097</b>	<b>139.441</b>	<b>46.712</b>	<b>1.714.901</b>	<b>1.592</b>	<b>418.678</b>	<b>49.612</b>	<b>233.118</b>	<b>6.776</b>	<b>3.900</b>	<b>17.234</b>	<b>8.217</b>	<b>591.862</b>	<b>280</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>936</b>	<b>27</b>	<b>39</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1.384</b>	<b>1</b>

**Datos de la plataforma THETIS**

<i>Tipo de barco</i>	<i>Recuento de barcos</i>	<i>Representación del tipo de barco sobre el total</i>	<i>Suma total de consumo de fuel [m tonnes]</i>	<i>Consumo promedio anual (m tonnes por barco)</i>	<i>Porcentaje de consumo sobre el total</i>	<i>Suma total de emisiones de CO<sub>2</sub> [m tonnes]</i>	<i>Porcentaje de emisiones sobre el total</i>
Bulk carrier	4.141	31,45%	6,013,161	1,452	13,63%	18,897,191	13,80%
Chemical tanker	1.433	10,88%	2,812,928	1,963	6,38%	8,856,168	6,47%
Combination carrier	9	0,07%	14,857	1,651	0,03%	46,604	0,03%
Container ship	1.857	14,10%	12,325,549	6,637	27,95%	38,190,673	27,89%
Container/ro-ro cargo ship	60	0,46%	337,072	5,618	0,76%	1,055,062	0,77%
Gas carrier	355	2,70%	897,839	2,529	2,04%	2,790,594	2,04%
General cargo ship	1.226	9,31%	1,787,361	1,458	4,05%	5,637,762	4,12%
LNG carrier	392	2,98%	3,762,968	9,599	8,53%	10,820,301	7,90%
Oil tanker	2.001	15,20%	5,373,244	2,685	12,18%	16,892,203	12,33%
Other ship types	249	1,89%	502,409	2,018	1,14%	1,576,982	1,15%
Passenger ship	188	1,43%	2,198,928	11,696	4,99%	6,925,293	5,06%
Refrigerated cargo carrier	145	1,10%	384,434	2,651	0,87%	1,202,028	0,88%
Ro-pax ship	413	3,14%	4,503,179	10,904	10,21%	14,117,896	10,31%
Ro-ro ship	228	1,73%	1,781,347	7,813	4,04%	5,569,058	4,07%
Vehicle carrier	470	3,57%	1,409,480	2,999	3,20%	4,377,917	3,20%
<b>Total general</b>	<b>13.167</b>	<b>100,00%</b>	<b>44,104,757</b>		<b>100,00%</b>	<b>136,955,732</b>	<b>100,00%</b>

**Necesidades térmicas (kWht) por puerto, barco y combustible**

	<i>HFO</i>								
	HFO Bahía de Algeciras	HFO Valencia	HFO Barcelona	HFO Cartagena	HFO Bilbao	HFO Huelva	HFO Tarragona	HFO Las Palmas	HFO Baleares
<b>Graneleros</b>	6,077,581,747	506,014,892	2,377,695,134	69,111,403	109,616,218	250,174,683	83,807,716	3,076,752,688	2,856,007
<b>Portacontenedores</b>	12,457,596,107	1,037,210,097	4,873,709,129	141,661,927	224,687,158	512,798,557	171,785,871	6,306,610,738	5,854,134
<b>Carga general</b>	1,806,509,073	150,408,589	706,749,495	20,542,772	32,582,481	74,362,280	24,911,125	914,538,361	848,924
<b>Tanques</b>	10,142,625,498	844,467,383	3,968,037,337	115,337,169	182,933,985	417,506,209	139,863,240	5,134,665,655	4,766,272
<b>Otros</b>	507,791,838	42,278,367	198,660,295	5,774,370	9,158,613	20,902,502	7,002,271	257,067,690	238,624
<b>Solo Pasaje</b>	2,222,485,890	185,042,506	869,489,561	25,273,065	40,085,104	91,485,351	30,647,299	1,125,125,045	1,044,401
<b>Ro-Ro/Ro-Pax</b>	6,352,343,835	528,891,378	2,485,188,625	72,235,868	114,571,870	261,484,858	87,596,589	3,215,849,951	2,985,124
<b>Total</b>	<b>39,566,933,988</b>	<b>3,294,313,212</b>	<b>15,479,529,575</b>	<b>449,936,574</b>	<b>713,635,428</b>	<b>1,628,714,440</b>	<b>545,614,111</b>	<b>20,030,610,128</b>	<b>18,593,487</b>

	<i>MGO</i>								
	MGO Bahía de Algeciras	MGO Valencia	MGO Barcelona	MGO Cartagena	MGO Bilbao	MGO Huelva	MGO Tarragona	MGO Las Palmas	MGO Baleares
<b>Graneleros</b>	763,494,296	90,470,913	425,110,509	12,356,497	7,111,652	31,428,116	14,984,066	1,079,310,908	510,628
<b>Portacontenedores</b>	1,564,981,594	185,443,839	871,375,367	25,327,879	14,577,195	64,420,158	30,713,769	2,212,330,484	1,046,667
<b>Carga general</b>	226,942,134	26,891,703	126,360,455	3,672,863	2,113,878	9,341,738	4,453,885	320,815,915	151,780
<b>Tanques</b>	1,274,164,139	150,983,174	709,449,395	20,621,249	11,868,343	52,449,086	25,006,290	1,801,217,457	852,167
<b>Otros</b>	63,791,190	7,558,992	35,518,674	1,032,405	594,190	2,625,870	1,251,943	90,178,182	42,664
<b>Solo Pasaje</b>	279,199,091	33,083,936	155,456,915	4,518,597	2,600,631	11,492,819	5,479,462	394,688,770	186,730
<b>Ro-Ro/Ro-Pax</b>	798,011,197	94,561,022	444,329,379	12,915,124	7,433,164	32,848,953	15,661,482	1,128,105,598	533,713
<b>Total</b>	<b>4,970,583,641</b>	<b>588,993,580</b>	<b>2,767,600,695</b>	<b>80,444,614</b>	<b>46,299,053</b>	<b>204,606,739</b>	<b>97,550,897</b>	<b>7,026,647,314</b>	<b>3,324,348</b>



	<i>GNL</i>								
	GNL Bahía de Algeciras	GNL Valencia	GNL Barcelona	GNL Cartagena	GNL Bilbao	GNL Huelva	GNL Tarragona	GNL Las Palmas	GNL Baleares
<b>Graneleros</b>	0	0	1,956,041	56,855	81,534	0	0	2,894,520	1,175
<b>Portacontenedores</b>	0	0	4,009,418	116,540	167,124	0	0	5,933,076	2,408
<b>Carga general</b>	0	0	581,416	16,900	24,235	0	0	860,371	349
<b>Tanques</b>	0	0	3,264,356	94,884	136,068	0	0	4,830,544	1,961
<b>Otros</b>	0	0	163,430	4,750	6,812	0	0	241,842	98
<b>Solo Pasaje</b>	0	0	715,297	20,791	29,816	0	0	1,058,485	430
<b>Ro-Ro/Ro-Pax</b>	0	0	2,044,472	59,426	85,220	0	0	3,025,378	1,228
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>12,734,430</b>	<b>370,146</b>	<b>530,809</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>18,844,216</b>	<b>7,648</b>

**Necesidades mecánicas (kWhm) por barco, puerto y combustible**

	<i>HFO</i>								
	HFO Bahía de Algeciras	HFO Valencia	HFO Barcelona	HFO Cartagena	HFO Bilbao	HFO Huelva	HFO Tarragona	HFO Las Palmas	HFO Baleares
<b>Graneleros</b>	3,081,590,745	256,570,931	1,205,591,899	35,042,401	55,580,054	126,849,135	42,494,053	1,560,043,616	1,448,116
<b>Portacontenedores</b>	6,316,527,604	525,909,345	2,471,176,460	71,828,583	113,925,883	260,010,536	87,102,695	3,197,718,121	2,968,294
<b>Carga general</b>	915,976,432	76,263,510	358,351,857	10,416,053	16,520,695	37,704,818	12,630,993	463,709,591	430,440
<b>Tanques</b>	4,547,129,737	378,590,607	1,778,945,755	51,707,822	82,012,745	187,175,884	62,703,321	2,301,967,168	2,136,809
<b>Otros</b>	227,652,630	18,954,187	89,063,146	2,588,759	4,105,979	9,370,985	3,139,250	115,248,280	106,980
<b>Solo Pasaje</b>	996,382,217	82,958,035	389,808,521	11,330,390	17,970,906	41,014,603	13,739,761	504,414,715	468,225
<b>Ro-Ro</b>	3,220,906,733	268,170,276	1,260,095,641	36,626,637	58,092,779	132,583,872	44,415,172	1,630,571,806	1,513,584
<b>Total</b>	<b>19,306,166,098</b>	<b>1,607,416,892</b>	<b>7,553,033,277</b>	<b>219,540,646</b>	<b>348,209,040</b>	<b>794,709,833</b>	<b>266,225,244</b>	<b>9,773,673,297</b>	<b>9,072,448</b>

	<i>MGO</i>								
	MGO Bahía de Algeciras	MGO Valencia	MGO Barcelona	MGO Cartagena	MGO Bilbao	MGO Huelva	MGO Tarragona	MGO Las Palmas	MGO Baleares
<b>Graneleros</b>	394,910,843	46,795,300	219,884,746	6,391,292	3,678,441	16,255,922	7,750,379	558,264,263	264,118
<b>Portacontenedores</b>	809,473,238	95,919,227	450,711,397	13,100,627	7,539,928	33,320,771	15,886,432	1,144,308,871	541,379
<b>Carga general</b>	117,383,863	13,909,502	65,358,856	1,899,757	1,093,385	4,831,933	2,303,734	165,939,266	78,507
<b>Tanques</b>	582,845,095	69,064,730	324,525,771	9,432,846	5,428,975	23,991,958	11,438,709	823,936,829	389,809
<b>Otros</b>	29,180,214	3,457,735	16,247,424	472,257	271,802	1,201,160	572,680	41,250,502	19,516
<b>Solo Pasaje</b>	127,714,959	15,133,694	71,111,168	2,066,957	1,189,615	5,257,198	2,506,488	180,543,783	85,416
<b>Ro-Ro</b>	412,764,412	48,910,874	229,825,541	6,680,236	3,844,740	16,990,838	8,100,767	583,502,896	276,059
<b>Total</b>	<b>2,474,272,624</b>	<b>293,191,061</b>	<b>1,377,664,904</b>	<b>40,043,971</b>	<b>23,046,887</b>	<b>101,849,781</b>	<b>48,559,190</b>	<b>3,497,746,410</b>	<b>1,654,804</b>

	<i>GNL</i>							
	<b>GNL Bahía de Algeciras</b>	<b>GNL Valencia</b>	<b>GNL Barcelona</b>	<b>GNL Cartagena</b>	<b>GNL Bilbao</b>	<b>GNL Huelva</b>	<b>GNL Tarragona</b>	<b>GNL Las Palmas</b>
<b>Graneleros</b>	0	0	1,036,702	30,133	43,213	0	0	1,534,095
<b>Portacontenedores</b>	0	0	2,124,992	61,766	88,576	0	0	3,144,530
<b>Carga general</b>	0	0	308,151	8,957	12,845	0	0	455,997
<b>Tanques</b>	0	0	1,566,891	45,544	65,313	0	0	2,318,661
<b>Otros</b>	0	0	78,447	2,280	3,270	0	0	116,084
<b>Solo Pasaje</b>	0	0	343,342	9,980	14,312	0	0	508,073
<b>Ro-Ro</b>	0	0	1,083,570	31,496	45,166	0	0	1,603,450
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6,542,094</b>	<b>190,156</b>	<b>272,694</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>9,680,891</b>

## Emisiones por barco y por puerto en el caso actual y bajo supuestos de flotas alternativas

### Caso actual

Emisiones con carbon slippage (por puerto)	HFO			MGO			LNG			Total puerto
	CH4	N2O	CO2	CH4	N2O	CO2	CH4	N2O	CO2	
Bahía de Algeciras	2.670,77	165.544,89	11.409.521,08	335,51	3.999,33	1.317.005,84	0,00	0,00	0,00	<b>12.899.077,43</b>
Valencia	222,37	13.783,14	949.948,16	39,76	473,90	156.059,74	43,24	4,65	551,24	<b>1.121.126,20</b>
Barcelona	1.044,87	64.765,11	4.463.677,15	186,81	2.226,81	733.303,48	470,73	21,86	2.590,18	<b>5.268.287,01</b>
Cartagena	30,37	1.882,50	129.743,71	5,43	64,73	21.314,60	34,91	0,64	75,29	<b>153.152,18</b>
Bilbao	48,17	2.985,79	205.783,91	3,13	37,25	12.267,40	0,00	0,00	0,00	<b>221.125,65</b>
Huelva	109,94	6.814,41	469.656,10	13,81	164,63	54.212,60	0,00	0,00	0,00	<b>530.971,48</b>
Tarragona	36,83	2.282,81	157.333,29	6,58	78,49	25.847,09	35,26	0,77	91,30	<b>185.712,41</b>
Las Palmas	1.352,07	83.806,47	5.776.026,74	474,30	5.653,64	1.861.780,47	316,73	16,17	1.916,46	<b>7.731.343,05</b>
Baleares	1,26	77,79	5.361,62	0,22	2,67	880,82	1,43	0,03	3,11	<b>6.328,95</b>
<b>Total</b>	<b>5.516,63</b>	<b>341.942,92</b>	<b>23.567.051,75</b>	<b>1.065,56</b>	<b>12.701,46</b>	<b>4.182.672,04</b>	<b>902,31</b>	<b>44,12</b>	<b>5.227,57</b>	<b>28.117.124,35</b>

<i>Equivalente CO2</i>	<i>HFO</i>			<i>MGO</i>			<i>LNG</i>			<b>Total</b>
	<b>CH4</b>	<b>N2O</b>	<b>CO2</b>	<b>CH4</b>	<b>N2O</b>	<b>CO2</b>	<b>CH4</b>	<b>N2O</b>	<b>CO2</b>	
(toneladas equivalentes CO2)										
Graneleros	847,37	52.523,30	3.619.959,12	163,67	10.145,08	642.469,07	16,86	6,78	802,97	<b>4.326.934,21</b>
Portacontenedores	1.736,90	107.660,27	7.420.054,64	335,49	20.794,99	1.316.908,68	34,55	13,89	1.645,89	<b>8.869.185,31</b>
Carga general	251,87	15.612,10	1.076.001,82	48,65	3.015,54	190.968,42	5,01	2,01	238,68	<b>1.286.144,10</b>
Tanques	1.414,14	87.653,97	6.041.200,46	273,15	16.930,70	1.072.190,13	445,49	11,31	1.340,04	<b>7.221.459,39</b>
Otros	70,80	4.388,41	302.453,47	13,68	847,64	53.679,34	22,30	0,57	67,09	<b>361.543,28</b>
Solo Pasaje	309,87	19.207,03	1.323.767,97	59,85	3.709,91	234.941,87	97,62	2,48	293,63	<b>1.582.390,24</b>
Ro-Ro/Ro-Pax	885,68	54.897,83	3.783.614,27	171,07	10.603,73	671.514,53	17,62	7,08	839,27	<b>4.522.551,07</b>
<b>Total</b>	<b>5.516,63</b>	<b>341.942,92</b>	<b>23.567.051,75</b>	<b>1.065,56</b>	<b>66.047,57</b>	<b>4.182.672,04</b>	<b>639,46</b>	<b>44,12</b>	<b>5.227,57</b>	<b>28.170.207,61</b>

**Escenario GNL**

<i>(toneladas)</i>	<i>Bahía de Algeciras</i>	<i>Valencia</i>	<i>Barcelona</i>	<i>Cartagena</i>	<i>Bilbao</i>	<i>Huelva</i>	<i>Tarragona</i>	<i>Las Palmas</i>	<i>Baleares</i>	<i>Total</i>
<b>Graneleros</b>	1.489.584	130.078	611.221	17.766	25.390	61.316	21.544	907.964	734	<b>3.265.600</b>
<b>Portacontenedores</b>	3.053.293	266.630	1.252.858	36.416	52.044	125.684	44.160	1.861.111	1.504	<b>6.693.704</b>
<b>Carga general</b>	442.766	38.664	181.680	5.280	7.547	18.225	6.403	269.884	218	<b>970.671</b>
<b>Tanques</b>	2.198.052	191.950	901.950	26.216	37.466	90.479	31.791	1.339.860	1.083	<b>4.818.850</b>
<b>Otros</b>	110.045	9.610	45.156	1.312	1.875	4.529	1.591	67.080	54	<b>241.256</b>
<b>Solo Pasaje</b>	481.644	42.060	197.638	5.744	8.209	19.826	6.966	293.594	237	<b>1.055.922</b>
<b>Ro-Ro/Ro-Pax</b>	1.556.927	135.959	638.854	18.569	26.538	64.088	22.517	949.013	767	<b>3.413.235</b>
<b>Total</b>	<b>9.332.314</b>	<b>814.954</b>	<b>3.829.359</b>	<b>111.306</b>	<b>159.072</b>	<b>384.150</b>	<b>134.975</b>	<b>5.688.509</b>	<b>4.599</b>	<b>20.459.243</b>

**Escenario Amoníaco**

<i>(toneladas)</i>	<i>Bahía de Algeciras</i>	<i>Valencia</i>	<i>Barcelona</i>	<i>Cartagena</i>	<i>Bilbao</i>	<i>Huelva</i>	<i>Tarragona</i>	<i>Las Palmas</i>	<i>Baleares</i>	<i>Total</i>
<b>Graneleros</b>	1.751.286	152.932	718.605	20.887	29.851	72.089	25.329	1.067.483	863	<b>3.839.327</b>
<b>Portacontenedores</b>	3.589.720	313.474	1.472.970	42.814	61.188	147.766	51.918	2.188.086	1.769	<b>7.869.706</b>
<b>Carga general</b>	520.555	45.458	213.599	6.209	8.873	21.428	7.529	317.300	257	<b>1.141.207</b>
<b>Tanques</b>	2.584.223	225.674	1.060.412	30.823	44.049	106.376	37.377	1.575.257	1.274	<b>5.665.463</b>
<b>Otros</b>	129.379	11.298	53.090	1.543	2.205	5.326	1.871	78.865	64	<b>283.642</b>
<b>Solo Pasaje</b>	566.263	49.450	232.361	6.754	9.652	23.309	8.190	345.176	279	<b>1.241.435</b>
<b>Ro-Ro/Ro-Pax</b>	1.830.460	159.846	751.093	21.832	31.201	75.348	26.474	1.115.743	902	<b>4.012.899</b>
<b>Total</b>	<b>10.971.887</b>	<b>958.132</b>	<b>4.502.131</b>	<b>130.861</b>	<b>187.020</b>	<b>451.642</b>	<b>158.689</b>	<b>6.687.910</b>	<b>5.408</b>	<b>24.053.679</b>

### Escenario Metanol

<i>(toneladas)</i>	<i>Bahía de Algeciras</i>	<i>Valencia</i>	<i>Barcelona</i>	<i>Cartagena</i>	<i>Bilbao</i>	<i>Huelva</i>	<i>Tarragona</i>	<i>Las Palmas</i>	<i>Baleares</i>	<i>Total</i>
<b>Graneleros</b>	1.644.882	143.640	674.945	19.618	28.038	67.709	23.790	1.002.625	811	<b>3.606.058</b>
<b>Portacontenedores</b>	3.371.616	294.428	1.383.476	40.213	57.471	138.788	48.764	2.055.143	1.662	<b>7.391.560</b>
<b>Carga general</b>	488.927	42.696	200.621	5.831	8.334	20.126	7.071	298.022	241	<b>1.071.870</b>
<b>Tanques</b>	2.427.211	211.963	995.984	28.950	41.372	99.913	35.106	1.479.548	1.196	<b>5.321.242</b>
<b>Otros</b>	121.519	10.612	49.864	1.449	2.071	5.002	1.758	74.074	60	<b>266.409</b>
<b>Solo Pasaje</b>	531.859	46.446	218.243	6.344	9.066	21.893	7.693	324.203	262	<b>1.166.008</b>
<b>Ro-Ro/Ro-Pax</b>	1.719.246	150.134	705.458	20.505	29.305	70.770	24.866	1.047.953	847	<b>3.769.084</b>
<b>Total</b>	<b>10.305.259</b>	<b>899.918</b>	<b>4.228.591</b>	<b>122.911</b>	<b>175.657</b>	<b>424.201</b>	<b>149.047</b>	<b>6.281.568</b>	<b>5.079</b>	<b>22.592.231</b>

### Escenario H2

Al tener la tasa de emisiones equivalentes de 0g/kWh de combustible para los tres GEI observados, un escenario donde todos los barcos españoles utilizaran H2 no tendría emisiones.

**Precio de los combustibles alternativos considerados, según Observatorio Maersk Mc-Kinney Moller**

<i>\$/GJ</i>	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	
Hidrógeno	35,7	34,1	32,6	31,2	30,1	29	27,8	26,6	25,4	25,1	24,7	24,3	23,7	23,2	22,7	22,1	21,6	21	20,3	19,6	18,9	18,2	17,4	16,6	16	15,3	14,6	14	13,3	13,3	13,3	
Amoniaco	61,0	57,4	54	50,5	47,5	44,5	41,4	38,2	35	34,6	34,1	33,5	32,8	32,1	31,4	30,8	30	29,3	28,4	27,6	26,7	25,8	24,9	23,9	23,1	22,2	21,4	20,5	19,7	19,7	19,7	
Metanol	76,8	73,5	70,3	67,1	64,4	61,7	58,9	56	53,1	52,3	51,3	50,3	49,2	48	46,9	45,9	44,7	43,5	42,3	40,9	39,5	38,1	36,7	35,2	33,9	32,5	31,2	29,9	28,5	28,5	28,5	
Biometanol	41,6	38,6	35,6	34,5	33,4	32,3	31,2	30,1	29,7	29,2	28,8	28,3	27,9	27,5	27	26,6	26,1	25,7	25,4	25,2	24,9	24,7	24,4	24,2	23,9	23,7	23,4	23,2	23	23	23	
<b><i>\$/kWh</i></b>																																
Hidrógeno	1,28	1,23	1,17	1,12	1,08	1,04	1,00	0,96	0,91	0,90	0,89	0,87	0,85	0,84	0,82	0,80	0,78	0,76	0,73	0,71	0,68	0,66	0,63	0,60	0,58	0,55	0,53	0,50	0,48	0,48	0,48	
Amoniaco	2,20	2,07	1,94	1,82	1,71	1,60	1,49	1,38	1,26	1,25	1,23	1,21	1,18	1,16	1,13	1,11	1,08	1,05	1,02	0,99	0,96	0,93	0,90	0,86	0,83	0,80	0,77	0,74	0,71	0,71	0,71	
Metanol	2,77	2,65	2,53	2,42	2,32	2,22	2,12	2,02	1,91	1,88	1,85	1,81	1,77	1,73	1,69	1,65	1,61	1,57	1,52	1,47	1,42	1,37	1,32	1,27	1,22	1,17	1,12	1,08	1,03	1,03	1,03	
Biometanol	1,50	1,39	1,28	1,24	1,20	1,16	1,12	1,08	1,07	1,05	1,04	1,02	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,93	0,91	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	



**Proyecciones**

**Caso Base**

**Emisiones**

Millones de tCO <sub>2</sub> /año	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
<b>Graneleros</b>	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	9	9	9	9	10	
<b>Portacontenedores</b>	9	9	9	10	10	10	10	11	11	11	12	12	12	13	13	14	14	14	15	15	15	16	16	17	17	18	18	19	19	20	
<b>Carga general</b>	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	
<b>Tanques</b>	7	7	8	8	8	8	8	9	9	9	9	10	10	10	10	11	11	11	12	12	12	13	13	13	14	14	14	15	15	16	16
<b>Otros</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
<b>Solo Pasaje</b>	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	
<b>Ro-Ro/Ro-Pax</b>	5	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7	8	8	8	8	9	9	9	9	9	10	10
<b>Total</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>43</b>	<b>44</b>	<b>45</b>	<b>47</b>	<b>48</b>	<b>49</b>	<b>50</b>	<b>52</b>	<b>53</b>	<b>55</b>	<b>56</b>	<b>58</b>	<b>59</b>	<b>61</b>	<b>62</b>
<b>Total agregado (MtCO<sub>2</sub> eq.)</b>	<b>1.336</b>																														

**CAPEX del caso base<sup>1</sup>**

	<i>VAN</i>
Graneleros	338.249.870.663 \$
Portacontenedores	553.850.937.562 \$
Carga general	442.893.253.146 \$
Tanques	977.672.340.163 \$
Otros	948.554.058.940 \$
Solo Pasaje	1.428.098.305.169 \$
Ro-Ro/Ro-Pax	2.389.350.201.590 \$
<b>Total</b>	<b>7.078.668.967.237 \$</b>

**OPEX del caso base**

	<i>VAN</i>
Graneleros	53.105.331.842 \$
Portacontenedores	108.853.291.124 \$
Carga general	15.785.104.638 \$
Tanques	88.626.087.556 \$
Otros	4.437.076.368 \$
Solo Pasaje	19.420.043.574 \$
Ro-Ro/Ro-Pax	55.506.176.857 \$
<b>Total</b>	<b>293.118.351.900 \$</b>

<sup>1</sup> Nota: las cifras numéricas de este apartado son antes de la aplicación del criterio de corrección de la inversión que le correspondería hacer a España.

**CAPEX caso GNL**

	VAN
Graneleros	938.029.317.002\$
Portacontenedores	2.057.668.228.822\$
Carga general	413.053.912.890\$
Tanques	1.195.971.917.289\$
Otros	1.846.810.888.997\$
Solo Pasaje	2.677.884.510.674\$
Ro-Ro/Ro-Pax	5.760.606.290.837\$
<b>Total</b>	<b>14.890.025.066.512\$</b>

**OPEX caso GNL**

	VAN
Graneleros	45.670.683.205\$
Portacontenedores	84.782.518.528\$
Carga general	12.294.538.021\$
Tanques	61.035.604.264\$
Otros	3.374.063.150\$
Solo Pasaje	13.374.324.954\$
Ro-Ro/Ro-Pax	47.735.414.340\$
<b>Total</b>	<b>268.267.146.461\$</b>

**CAPEX caso Amoníaco**

	VAN
Graneleros	1.082.639.799.423 \$
Portacontenedores	2.401.480.660.470 \$
Carga general	884.426.505.022 \$
Tanques	1.728.712.224.401 \$
Otros	2.194.496.615.699 \$
Solo Pasaje	2.677.884.510.674 \$
Ro-Ro/Ro-Pax	4.601.309.929.950 \$
<b>Total</b>	<b>15.570.950.245.639 \$</b>

**OPEX caso Amoníaco**

	VAN
Graneleros	290.287.921.387 €
Portacontenedores	598.565.629.181 €
Carga general	93.551.025.148 €
Tanques	429.413.968.312 €
Otros	26.676.362.073 €
Solo Pasaje	94.125.618.269 €
Ro-Ro/Ro-Pax	304.557.669.550 €
<b>Total</b>	<b>1.837.178.193.919 €</b>

**CAPEX caso Metanol y Biometanol**

	VAN
Graneleros	803.507.938.006 €
Portacontenedores	1.737.842.711.011 €
Carga general	332.247.182.811 €
Tanques	982.875.794.444 €
Otros	1.499.125.162.294 €
Solo Pasaje	2.192.866.402.460 €
Ro-Ro/Ro-Pax	4.717.239.566.039 €
<b>Total</b>	<b>12.265.704.757.065 €</b>

**OPEX caso Biometanol**

	VAN
Graneleros	251.784.271.840 €
Portacontenedores	516.097.832.212 €
Carga general	74.840.716.352 €
Tanques	371.542.902.892 €
Otros	18.601.342.783 €
Solo Pasaje	81.413.718.723 €
Ro-Ro/Ro-Pax	263.167.215.752 €
<b>Total</b>	<b>1.577.448.000.554 €</b>

**OPEX caso Metanol**

	<b>VAN</b>
Graneleros	277.098.787.040 €
Portacontenedores	567.986.563.476 €
Carga general	82.365.238.983 €
Tanques	408.898.010.079 €
Otros	20.471.530.985 €
Solo Pasaje	89.599.094.263 €
Ro-Ro/Ro-Pax	289.626.177.762 €
<b>Total</b>	<b>1.736.045.402.587 €</b>

**CAPEX caso Hidrógeno**

	VAN
Graneleros	1.341.593.453.990 €
Portacontenedores	3.017.144.782.256 €
Carga general	655.474.103.129 €
Tanques	1.835.260.285.824 €
Otros	2.889.868.069.105 €
Solo Pasaje	4.132.938.835.314 €
Ro-Ro/Ro-Pax	8.890.706.465.233 €
<b>Total</b>	<b>22.762.985.994.852 €</b>

**OPEX caso Hidrógeno**

	VAN
Graneleros	208.760.613.207 €
Portacontenedores	427.909.571.715 €
Carga general	62.052.302.649 €
Tanques	308.055.478.104 €
Otros	15.422.836.770 €
Solo Pasaje	67.502.142.687 €
Ro-Ro/Ro-Pax	218.198.495.621 €
<b>Total</b>	<b>1.307.901.440.752 €</b>





## CONSTRUCCIÓN DE CURVAS

```
import matplotlib.pyplot as plt

# Datos de ejemplo
categorias = [ 'LNG', 'Biometanol', 'Amoníaco', 'Hidrógeno' ]
alturas = [XX, XX, XX, XX] # Alturas de las barras
anchuras = [XX,XX,XX,XX] # Anchuras de las barras
colores = ['red', 'blue', 'green', 'purple'] # Colores de las barras
posiciones = [sum(anchuras[:i]) for i in range(len(anchuras))] # Ajustar posiciones para que no haya espacio entre las
barras

# Crear el gráfico de barras con colores variables
plt.bar(posiciones, alturas, width=anchuras, align='edge', alpha=0.7, color=colores)

# Añadir nombres a las categorías en el eje X
plt.xticks([p + w / 2 for p, w in zip(posiciones, anchuras)], categorias) # Centrar las etiquetas en las barras

# Añadir etiquetas y título
plt.xlabel('Poder de descarbonización (%)')
plt.ylabel('Precio por tonelada de combustible ($/tCO2)')
plt.title('Curvas de abatimiento marginal')

# Añadir valores de anchura encima de cada barra
for pos, altura, anchura in zip(posiciones, alturas, anchuras):
    plt.text(pos + anchura / 2, altura + 10, f'{anchura}%', ha='center')
```

```
# Mostrar el gráfico  
plt.show()
```