



**Universidad
de La Laguna**

Vías Para La Transición Energética Del Sector Marítimo

Trabajo Fin de Grado
Grado en Náutica y Transporte Marítimo
Mayo de 2023

Autor:
Eduardo Dorta Delgado
45899277V

Tutor:
Prof. Alejandro U. Gómez Correa

Escuela Politécnica Superior de Ingeniería
Sección Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval
Universidad de La Laguna

D. Alejandro U. Gómez Correa, Profesor de la UD de Construcción Naval, perteneciente al Departamento de Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima de la Universidad de La Laguna:

Expone que:

D. Eduardo Dorta Delgado con DNI 45899277V, ha realizado bajo mi dirección el trabajo fin de grado titulado: **Vías Para La Transición Energética Del Sector Marítimo**

Revisado dicho trabajo, estimo reúne los requisitos para ser juzgado por el tribunal que sea designado para su lectura.

Para que conste y surta los efectos oportunos, expido y firmo el presente documento.

En Santa Cruz de Tenerife a 23 de mayo de 2023.

Fdo.: Alejandro Gómez.

Director del trabajo.

Dorta Delgado, E. (2023). *Vías Para La Transición Energética Del Sector Marítimo*. Trabajo de Fin de Grado. Universidad de La Laguna.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se aborda la transición energética que debe experimentar el sector marítimo en los próximos años para adaptarse a las exigencias ambientales. Con este se pretende analizar la situación actual del sector, analizando los combustibles que impulsan la industria, las recientes regulaciones creadas por organismos internacionales y las alternativas existentes para lograr dicha transición hasta llegar al punto de cero emisiones. Para dicha tarea se ha realizado un estudio sobre los combustibles empleados actualmente e históricamente en la navegación marítima y se ha analizado las reacciones que han generado las nuevas legislaciones como por ejemplo la popularización de combustibles bajos en azufre. Además, se ha analizado los posibles escenarios futuros en los cuales el combustible será otro. Concretamente se ha profundizado en las opciones que tienen los sistemas eléctricos y el hidrógeno de dominar en un futuro la propulsión del sector marítimo teniendo en cuenta los obstáculos y necesidades que aún presentan estas tecnologías. Partiendo de la situación actual y tomando en cuenta las infraestructuras con las que cuentan cada tipo de sistema de propulsión, además de las acciones que los organismos nacionales e internacionales están tomando y poniendo la vista en el futuro para analizar si estos cumplirán con los requisitos de una industria que no genere huella ambiental.

Tras considerar todo lo anterior, se ha llegado a la conclusión de que el hidrógeno es una opción prometedora para el futuro descarbonizado de las industrias, ya que a través de este es posible generar energía eléctrica sin necesidad de emitir gases contaminantes a la atmósfera y tampoco requiere de grandes sistemas de baterías de litio. Por estos motivos, en el presente trabajo de investigación se ha querido detallar pasos a tomar para posicionar al hidrógeno como principal vector energético a nivel mundial.

Palabras claves: combustibles, emisiones, hidrógeno, regulaciones.

Dorta Delgado, E. (2023). *Vías Para La Transición Energética Del Sector Marítimo*. Trabajo de Fin de Grado. Universidad de La Laguna.

ABSTRACT

This research work analyses the energetic transition that the maritime sector must face in the coming years in order to adapt to environmental requirements. The aim is to analyse the current situation of the sector, analysing the fuels that drive the industry, the recent regulations created by international organisations and the existing alternatives for achieving this transition to the point of zero emissions. For this task, a study has been carried out on the fuels currently and historically used in maritime navigation and the reactions generated by new legislation, such as the popularisation of low-sulphur fuels, have been analysed. Furthermore, the possible future scenarios in which the fuel used will be another kind of fuel have also been analysed. Specifically, the options for electric systems and hydrogen to dominate maritime propulsion in the future were examined in depth, taking into account the obstacles and needs that these technologies still present. Starting from the current situation and taking into account the infrastructures that each type of propulsion system has, as well as the actions that national and international organisations are taking and looking to the future to analyse whether they will meet the requirements of an industry that does not generate an environmental impact.

After considering all of the above, it has been concluded that hydrogen is a powerful option for the decarbonised future of industries, as it is possible to generate electrical energy without the need to emit polluting gases into the atmosphere and it does not require large lithium battery systems. For these reasons, this research work aims to detail the steps to be taken to position hydrogen as the main energy vector worldwide.

Keywords: fuels, emissions, hydrogen, regulations.

AGRADECIMIENTOS

En este apartado, quería agradecer la ayuda prestada a mi tutor Alejandro Urbano Gómez quien me ha ayudado durante el proceso de la elaboración de este Trabajo de Fin de Grado y que me ha asesorado resolviendo mis dudas en las reuniones que hemos tenido. En segundo lugar y al tratarse de la última tarea que realizaré durante mis estudios universitarios, quería agradecer a todos los profesores que me han acompañado durante estos cuatro años, tanto los de la Universidad de La Laguna como los que me acogieron durante mi estancia durante mi Erasmus en Alemania en la facultad náutica de Leer. Gracias a todos ellos he adquirido un amplio abanico de conocimientos en materias muy diversas que me hacen sentirme preparado para mi carrera como marino mercante.

Índice del TFG

1. Actualidad en la industria marítima	10
1.1. Importancia para la economía española	12
1.2. Principales fuentes de energía.....	18
1.3. Emisiones producidas	20
2. Legislaciones ambientales acordadas internacionalmente	24
2.1. IMO 2020	25
2.2. Zonas de Control de Emisiones	26
2.2.1. Regulación 13 – Control de emisiones de NOx	28
3. Inversión actual en alternativas.....	30
3.1. Sistemas SCR marinos	30
3.2. Scrubbers	33
3.2.1. Problemas con las descargas de aguas de lavado.....	35
3.3. Combustibles con bajo contenido de azufre.....	37
4. Vías para la descarbonización de la industria marítima	40
4.1. Gas Natural Licuado	40
4.2. Electrificación.....	45
4.2.1. Obtención de la energía	47
4.2.2. Motores LNG.....	49
4.2.3. Buques eléctricos actuales.....	51
4.3. Hidrógeno	53
4.3.1. Tipos de hidrógeno	54
4.3.2. Métodos de producción del hidrógeno.....	55
4.3.3. Acciones en curso.....	58

4.3.4. Motor de combustión de hidrógeno	61
4.3.5. Pila de combustible de hidrógeno.....	63
4.3.6. Almacenamiento del hidrógeno	66
4.3.7. Buques de hidrógeno actuales	70
5. Conclusiones	72
Bibliografía	74
Permiso de divulgación del Trabajo Final de Grado.....	78

Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1: EVOLUCIÓN DE LAS MERCANCÍAS TRANSPORTADAS	10
ILUSTRACIÓN 2: VOLUMEN DE CARGA TRANSPORTADA POR BUQUES PORTACONTENEDORES	11
ILUSTRACIÓN 3: PRECIO DE LOS FLETES MARÍTIMOS SEGÚN EL ÍNDICE DE SHANGHÁI	12
ILUSTRACIÓN 4: PRINCIPALES CLIENTES DE LA INDUSTRIA MARÍTIMA	13
ILUSTRACIÓN 5: EMPLEO Y RIQUEZA GENERADAS DEL POR SECTORES DE LA MAR.....	14
ILUSTRACIÓN 6: VARIACIÓN TRÁFICO PORTUARIO EN LOS PRINCIPALES PUERTOS ESPAÑOLES ENTRE 2019 Y 2020	15
ILUSTRACIÓN 7: MAPA DE TRÁFICO DE CONTENEDORES. 2014. ESPAÑA.	15
ILUSTRACIÓN 8: MAPA DE ESPECIALIZACIÓN PORTUARIA. 2014. ESPAÑA.	16
ILUSTRACIÓN 9: MAPA DE TRÁFICO DE CONTENEDORES. 2014. CANARIAS.....	16
ILUSTRACIÓN 10: MAPA DE TRÁFICO MARÍTIMO DE VIAJEROS. CANARIAS. 2014.....	17
ILUSTRACIÓN 11: EVOLUCIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS BUQUES MERCANTES.....	18
ILUSTRACIÓN 12: DEMANDA DE ENERGÍA DE LA INDUSTRIA MARÍTIMA Y PIB GLOBAL	20
ILUSTRACIÓN 13: EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO EN LA ATMÓSFERA ENTRE 1880 Y 2009	21
ILUSTRACIÓN 14: EMISIONES DE GEI DE MEDIOS DE TRANSPORTE EN 2018	21
ILUSTRACIÓN 15: CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS POR TAMAÑO SEGÚN ISO 16890	23
ILUSTRACIÓN 16: CONTAMINACIÓN PRODUCIDA POR LA INDUSTRIA MARÍTIMA EN EUROPA.....	23
ILUSTRACIÓN 17: EMISIONES DE CO2 TOTALES POR TIPO DE FLOTA Y MEDIDAS POR EMBARCACIÓN	24
ILUSTRACIÓN 18: EVOLUCIÓN DEL PORCENTAJE EN AZUFRE DE LOS COMBUSTIBLES MARINOS.....	26
ILUSTRACIÓN 19: ZONAS ECA EN AMÉRICA.....	27
ILUSTRACIÓN 20: ZONAS ECA EN EUROPA	27
ILUSTRACIÓN 21: NUEVA ZONA ECA DEL MAR MEDITERRÁNEO	28
ILUSTRACIÓN 22: LIMITACIONES IMO TIER I, TIER II Y TIER III	29
ILUSTRACIÓN 23: ZONAS DE CONTROL DE EMISIONES DE NOX	29
ILUSTRACIÓN 24: FUNCIONAMIENTO SISTEMA SCR MARINO	31
ILUSTRACIÓN 25: SISTEMA SCR DE ALTA PRESIÓN	32
ILUSTRACIÓN 26: SISTEMA SCR DE BAJA PRESIÓN	32
ILUSTRACIÓN 27: SCRUBBER DE CIRCUITO ABIERTO	34
ILUSTRACIÓN 28: SCRUBBER DE CIRCUITO CERRADO	34
ILUSTRACIÓN 29: DISTRIBUCIÓN MUNDIAL DE LAS DESCARGAS DE AGUAS DE LAVADO DE GASES DE ESCAPE.....	36
ILUSTRACIÓN 30: DISTRIBUCIÓN EN ESPAÑA DE LAS DESCARGAS DE AGUAS DE LAVADO DE GASES DE ESCAPE	36
ILUSTRACIÓN 31: PRECIO DE LOS COMBUSTIBLES MARINOS 2020-2022	38
ILUSTRACIÓN 32: PRECIO VERY LOW SULPHUR FUEL OIL.....	39
ILUSTRACIÓN 33: PRECIO FUELÓLEO PESADO	39

ILUSTRACIÓN 34: COMPARACIÓN DE LA EMISIONES DEL GAS NATURAL Y EL MARINE DIESEL OIL	41
ILUSTRACIÓN 35: COMPARACIÓN ENTRE LA EFICIENCIA DEL HFO Y LNG	42
ILUSTRACIÓN 36: SECUENCIA DE UNA EXPLOSIÓN BLEVE	43
ILUSTRACIÓN 37: COMERCIO MUNDIAL DE GAS NATURAL	44
ILUSTRACIÓN 38: COMPARACIÓN ENTRE MOTOR ELÉCTRICO Y MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA	46
ILUSTRACIÓN 39: PRODUCCIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE	48
ILUSTRACIÓN 40: CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA EN ESPAÑA	49
ILUSTRACIÓN 41: FUNCIONAMIENTO MOTOR DUAL-FUEL	50
ILUSTRACIÓN 42: BUQUE YARA BIRKELAND	51
ILUSTRACIÓN 43: BUQUE MEDSTRAUM	52
ILUSTRACIÓN 44: COSTOS DE PRODUCCIÓN DE LOS TIPOS DE HIDRÓGENO	55
ILUSTRACIÓN 45: MÉTODOS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO	55
ILUSTRACIÓN 46: ELECTRÓLISIS DEL AGUA	56
ILUSTRACIÓN 47: INTERIOR DE UNA CELDA FOTOELECTROCATALÍTICA	57
ILUSTRACIÓN 48: CONCEPTO DE 2021 DE PLANTA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO CON ALGAS	58
ILUSTRACIÓN 49: TRAZADO DE LOS GASEODUCTOS DEL PROYECTO H2 MED	59
ILUSTRACIÓN 50: PROYECTOS EN EUROPA QUE INVESTIGAN EL HIDRÓGENO VERDE COMO COMBUSTIBLE	60
ILUSTRACIÓN 51: FUTURA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE DEL PUERTO DE SANTA CRUZ DE TENERIFE	61
ILUSTRACIÓN 52: SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO Y PROPULSIÓN DEL BMW HYDROGEN SERIE 7	62
ILUSTRACIÓN 53: COMPARACIÓN DE EMISIONES ENTRE HIDRÓGENO, GNL, HFO Y MGO	63
ILUSTRACIÓN 54: PILA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO	64
ILUSTRACIÓN 55: COMPARATIVA PESO/AUTONOMÍA BATERÍAS DE LITIO Y PILA DE HIDRÓGENO	65
ILUSTRACIÓN 56: TIPOS DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO	67
ILUSTRACIÓN 57: TANQUES DE HIDRÓGENO TIPO IV DEL TOYOTA MIRAI	67
ILUSTRACIÓN 58: TÉCNICAS DE ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO EN MATERIALES	68
ILUSTRACIÓN 59: DENSIDADES DE DIVERSOS MÉTODOS DE ALMACENAMIENTO	69
ILUSTRACIÓN 60: CATAMARÁN NEW YORK HORNBLLOWER HYBRID	70
ILUSTRACIÓN 61: BUQUE DE SERVICIO REM ENERGY	71
ILUSTRACIÓN 62: MF HYDRA	71

1. Actualidad en la industria marítima

Alrededor del 90% del comercio global se transporta por vía marítima, utilizando una flota de aproximadamente 80.000 buques en todo el mundo, siendo la única alternativa que tiene la humanidad para sustentar el sistema de consumo globalizado a gran escala que impera en el mundo actual y que, gracias a los bajos costos de los fletes, consigue beneficios para el libre mercado. De hecho, factores como la mayor capacidad que ofrecen los buques de carga ante los otros medios, su versatilidad y la estabilidad ante las condiciones climáticas adversas han hecho que el transporte por mar se convierta en pilar fundamental para la economía mundial.

La UNCTAD (Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Comercio y el Desarrollo) realiza cada año un informe sobre el comercio y el desarrollo donde se reportó que en 2017 el transporte marítimo alcanzó un máximo histórico superior a 10.000 millones de toneladas, un incremento del 2,1% con respecto al año anterior. El aumento se vio impulsado por las economías emergentes de Asia, incluyendo a China, Corea, los países del Golfo Pérsico, el sudeste asiático e India, así como por las economías occidentales. Asimismo, el comercio marítimo internacional está experimentando un cambio en la composición de sus países participantes, donde los países en desarrollo están ganando una proporción cada vez más significativa en el mercado, ya que este cada vez se torna más accesible para los usuarios de países subdesarrollados.

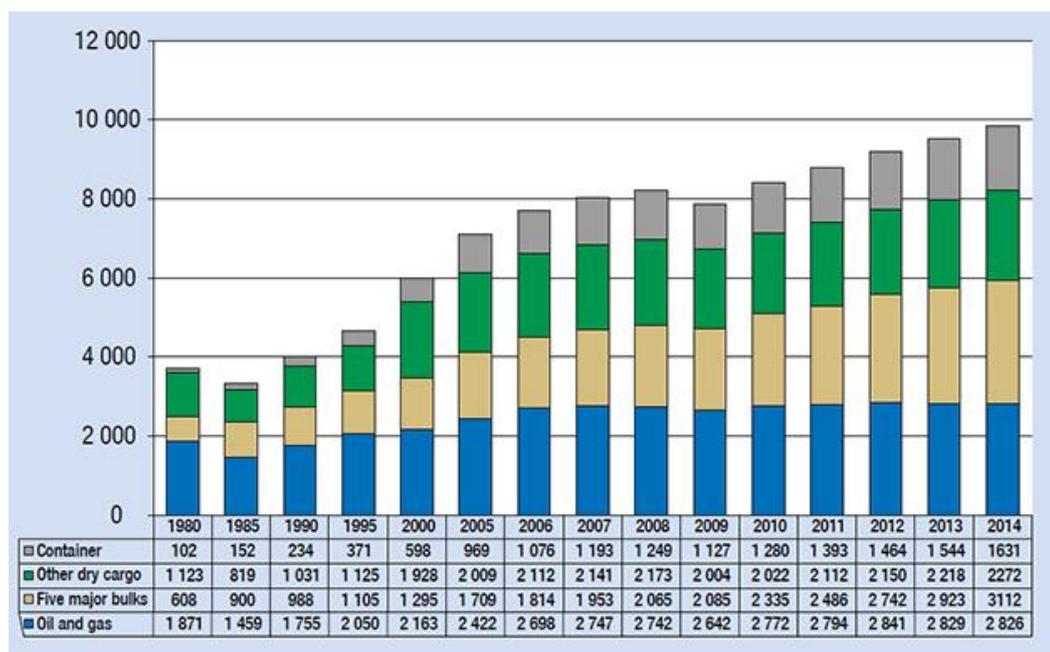


Ilustración 1: Evolución de las mercancías transportadas

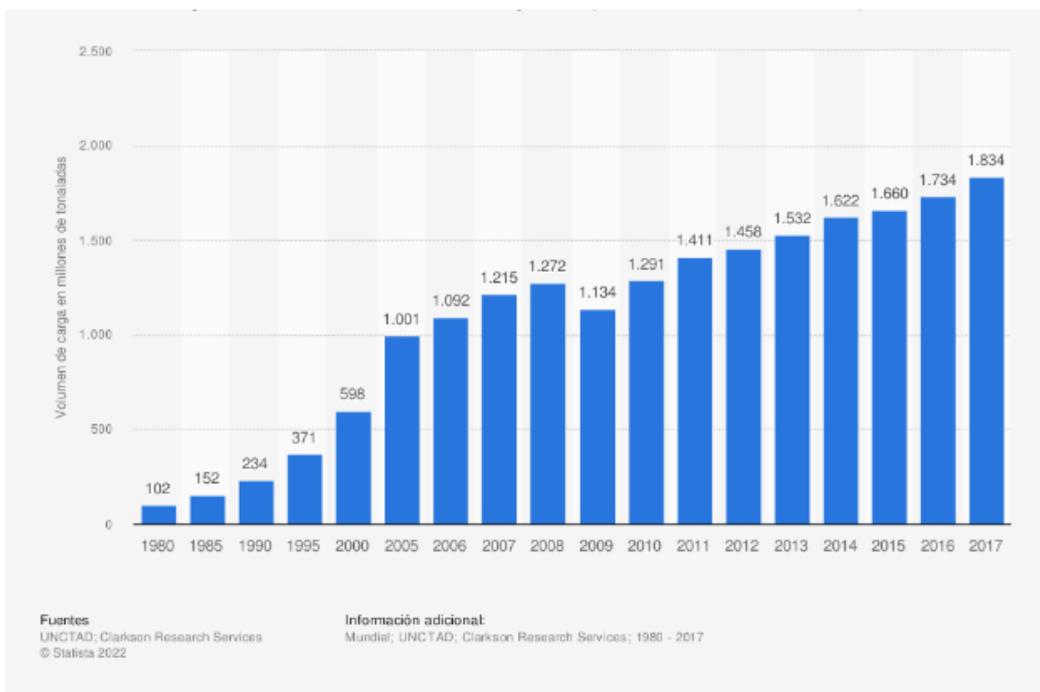


Ilustración 2: Volumen de carga transportada por buques portacontenedores

Sin embargo, de este medio de transporte nace un problema, y es que la propulsión de los buques se basa casi por completo en motores de combustión interna que utilizan combustibles fósiles que, como es bien sabido, causan gran parte de los gases que retienen el calor en la atmósfera y contribuyen al calentamiento global en el planeta y que son conocidos como gases de efecto invernadero. Pero debido a la relevancia que ha adquirido el transporte marítimo para la economía mundial, se dificulta la tarea de lograr la transición ecológica sin debilitarla.

A raíz de esta problemática, en los últimos tiempos se ha acelerado el interés internacional por alcanzar la transición ecológica en la industria marítima que es un tema de actualidad muy relevante, ya que se calcula que la industria marítima es una de las mayores fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. De acuerdo con la Organización Marítima Internacional (OMI), se estima que este sector es culpable del 2,2% de las emisiones totales de GEI en todo el mundo.

Recientemente, ha crecido la conciencia sobre la necesidad de reducir las emisiones en la industria marítima, y se han implementado diversas iniciativas y políticas para fomentar la transición hacia una industria que tenga un enfoque más sostenible y un mayor respeto hacia el medio ambiente, lo cual representa un reto para la industria que se enfrenta a uno de los mayores cambios en la historia de la navegación.



Ilustración 3: Precio de los fletes marítimos según el índice de Shanghái

Además, a este escenario se le suma el encarecimiento de los fletes marítimos generalizado en todo el mundo a raíz de la pandemia del COVID-19. Las causas del encarecimiento son las siguientes:

- **Escasez de contenedores:** durante la pandemia se produjo un desnivel entre oferta y demanda de contenedores a nivel global, lo que llevó a una escasez de contenedores y el consiguiente aumento de los fletes. La causa de esto es la detención de las cadenas de suministro y el aumento de la demanda de bienes a nivel mundial.
- **Congestión en los puertos:** también a raíz de la pandemia de COVID-19 se ralentizaron los movimientos de bienes en los puertos debido a las medidas de seguridad necesarias, desacelerando la economía mundial.
- **Aumento en demanda de bienes:** como tendencia general en todo el mundo se ha experimentado un aumento en el volumen de carga transportada que produce también parte del encarecimiento de los fletes y que perdura hasta hoy en día.

Sin embargo, esta tendencia al alza, que se mantuvo desde el comienzo de la pandemia hasta mitad del 2022; momento en el que comenzó el descenso del precio de los fletes, aún mantiene su efecto ya que a comparación de los datos anteriores a la pandemia los fletes marítimos hoy en día son significativamente más costosos que antes de esta.

1.1. Importancia para la economía española

El territorio español cuenta con una extensa costa marítima, que representa más del 75% de su perímetro total, lo que convierte a España en un país con una fuerte presencia y

relación con el mar. De los 7.880 kilómetros de costa española; 3.200 kilómetros dan al mediterráneo y 4.680 al atlántico, abarcando un 80% del perímetro español.

Debido a su amplio perímetro costero, España depende en gran medida del transporte marítimo internacional, que representa el 85% de las mercancías importadas al país, en comparación con otros medios de transporte como el aéreo, por carretera o por ferrocarril, que solo representan el 15%. Los principales puertos del país para el sector marítimo internacional incluyen Valencia, Cartagena, Bahía de Algeciras, Barcelona, Tarragona, Bilbao, Huelva y Las Palmas, y emplean a miles de personas para llevar a cabo esta importante tarea. De hecho, en palabras de Federico Esteve, presidente de Honor del CME:

«El sector marítimo en España cuenta con 461.000 empleos directos, un valor añadido bruto de 27.000 millones de euros, una producción de 52.000 millones y un peso sobre el valor añadido bruto nacional del 3,24 %. Si se tienen en cuenta el efecto directo, indirecto y el inducido, el impacto de este sector a la economía nacional se traduce en 1.300.000 empleos, 68.000 millones de euros de aportación de valor añadido bruto, una producción de 186.000 millones y un peso sobre el valor añadido bruto nacional del 7,2 %, lo que le sitúa como el tercer sector económico más importante del país, con un importante efecto multiplicador, ya que por cada euro de gasto genera 2,5 euros, y por cada empleo, 2,8 puestos de trabajo».

Véase en las siguientes tablas los informes detallados de los principales clientes de la industria y del empleo y riqueza generadas del por sectores de la mar de 2005, utilizando la información proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística.

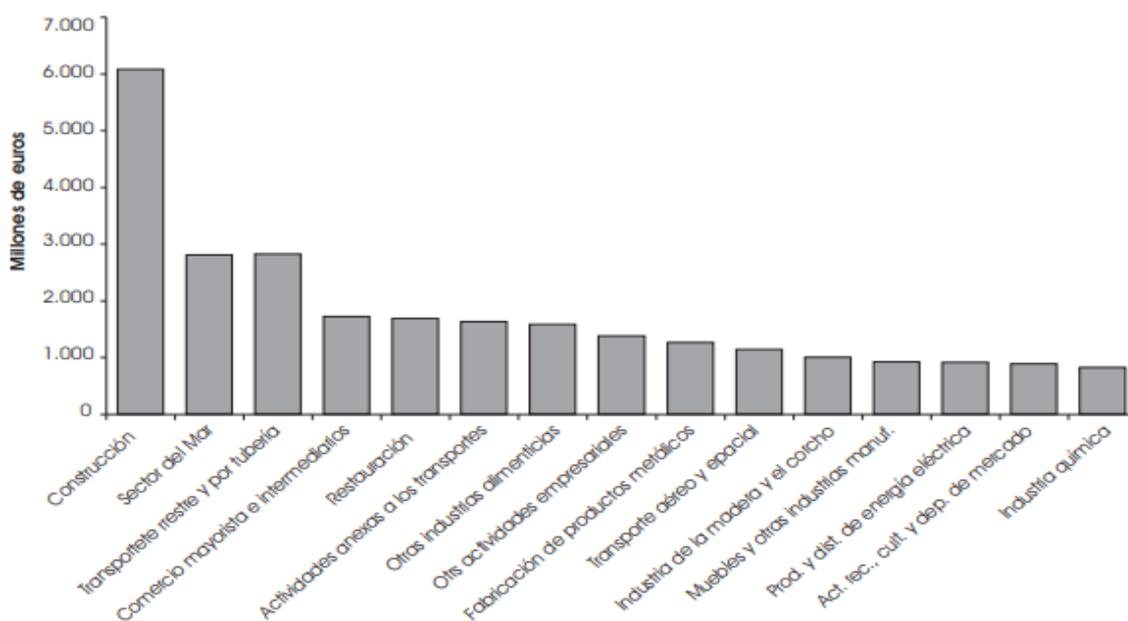


Ilustración 4: Principales clientes de la industria marítima

Sectores	VAB (millones de euros)	Empleo (miles de personas)
Total Sector del Mar	26.873	462
Pesca	1.693	45
Construcción naval	844	39
Transporte marítimo	1.129	13
Náutica de recreo	1.079	16
Industria auxiliar	3.099	45
Investigación marina	392	9
Turismo marítimo	3.303	62
Puertos	9.366	94
Armada	704	26
Comercio y distribución	2.938	52
Seguros y banca	1.734	17
Otras actividades	593	43

Ilustración 5: Empleo y riqueza generadas del por sectores de la mar

Se destaca de estos informes la **relevancia del sector pesquero español** que se sitúa como la primera potencia de europea generando el 20% de la producción total del continente y las expectativas para el futuro se presentan alentadoras. Todo esto es favorecido por el hecho de contar con casi una cuarta parte de la flota pesquera de la Unión Europea; concretamente el 23,6% de las embarcaciones pesqueras europeas son españolas. También se extrae de la tabla, los 94.000 empleos que generan los puertos nacionales y que los posicionan como una fuente de riqueza para la sociedad española.

La relevancia del sector no se limita solo a su contribución directa, que representa el 2,56% de la producción efectiva española, el 2,75% del Valor Agregado Bruto (VAB) nacional y el 2,29% del empleo, además, su impacto se extiende a otras actividades económicas.

En cuanto a las exportaciones nacionales, el 60% del producto se envía por vía marítima a los principales destinos que son los Estados Unidos, Oriente Medio, China y Japón, siendo los puertos más importantes de España se encuentran principalmente en la costa mediterránea peninsular y en ambos archipiélagos. En estas áreas, generalmente se concentran las mayores áreas de atraque y movimiento de buques y mercancías, con más de un tercio del tráfico de mercancías a nivel nacional concentrado en los puertos de la Bahía de Algeciras y Valencia, lo que destaca aún más la relevancia de estos puertos.

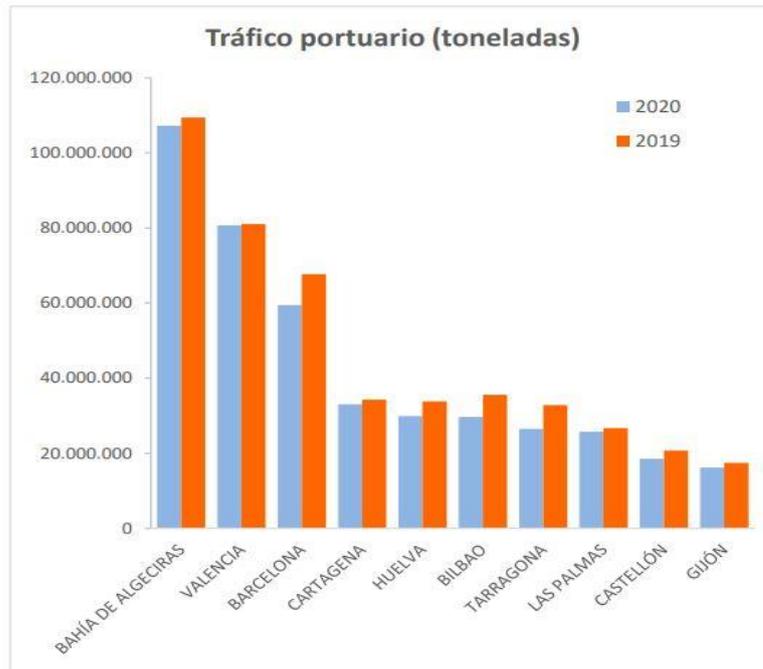


Ilustración 6: Variación tráfico portuario en los principales puertos españoles entre 2019 y 2020

Sobre el puerto de Algeciras, este destaca por su gran volumen de mercancías, siendo el puerto español con mayor actividad en este ámbito gracias a su ubicación estratégica para el transporte de carga internacional. A nivel europeo, se sitúa en el sexto lugar en cuanto al volumen de mercancías transportadas por mar y lidera en el Mediterráneo. En 2018, este puerto movió un total de 107 millones de toneladas de mercancías, y de estas 60 millones correspondieron a contenedores. Durante ese período, el transporte marítimo empleó a unas 24.000 personas y manejó más del 75% de las importaciones y alrededor del 60% de las exportaciones de España.

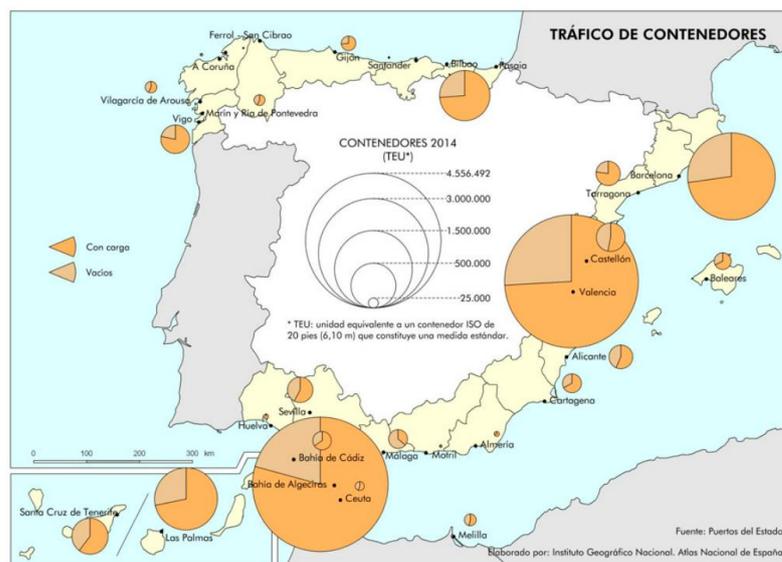


Ilustración 7: Mapa de tráfico de contenedores. 2014. España.

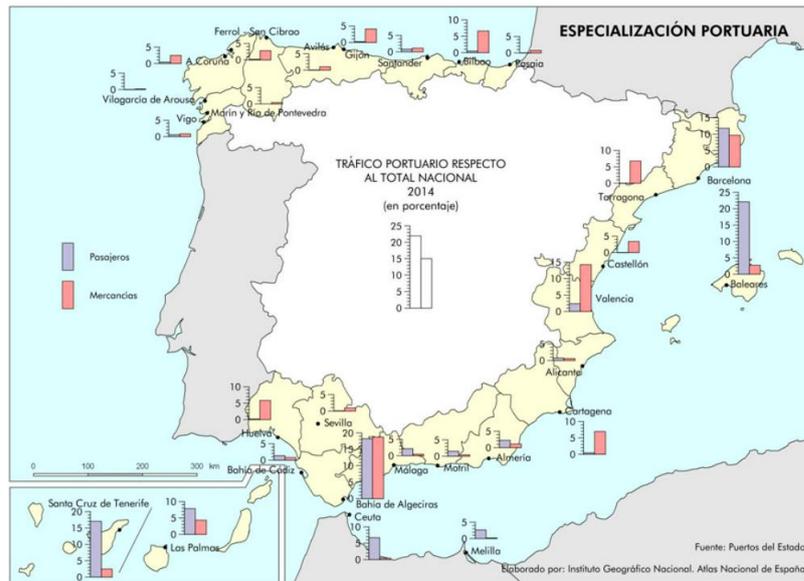


Ilustración 8: Mapa de especialización portuaria. 2014. España.

El **tráfico de contenedores** ha experimentado un gran aumento en las últimas décadas, como se puede apreciar en la ilustración anterior. Actualmente, más del 71% de la carga transportada se realiza mediante el uso de contenedores, y esto es especialmente notable en los puertos de la Bahía de Algeciras y Valencia. Estos puertos tienen una función de transbordo importante, ya que conectan los buques que viajan entre Europa, Asia y América, así como África con Europa.

La posición estratégica del puerto de Algeciras, situado en la confluencia del Atlántico y el Mediterráneo, lo convierte en un punto clave para el transporte marítimo. Por esta razón, muchas navieras han incluido este puerto en sus rutas, lo que reduce el tiempo y la distancia de su ruta transcontinental. En 2018, el puerto de Algeciras movió un total de 107 millones de toneladas de mercancías, de las cuales 60 millones se transportaron en contenedores, consolidando su posición como el puerto español con mayor volumen de mercancías y líder en el Mediterráneo. Otros puertos importantes como Barcelona, Las Palmas, Bilbao y Tenerife también se encuentran a media tabla en el ranking de puertos de España en cuanto a tráfico de mercancías se refiere.



Ilustración 9: Mapa de tráfico de contenedores. 2014. Canarias.

En cuanto al transporte de pasajeros, los archipiélagos españoles son los que registran el mayor movimiento, concentrando casi el 50% del tráfico de viajeros.

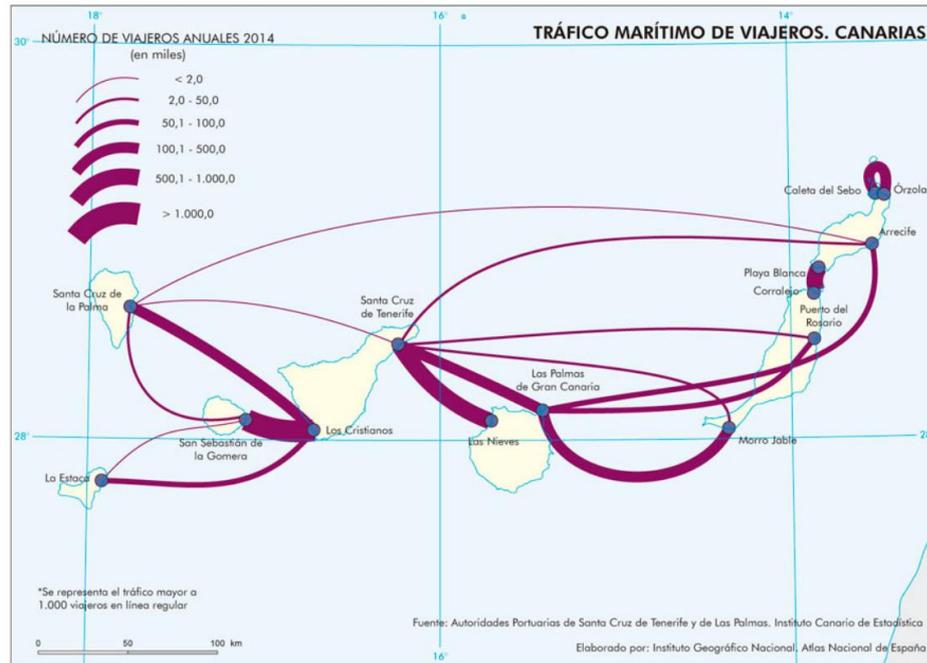


Ilustración 10: Mapa de tráfico marítimo de viajeros. Canarias. 2014.

Las conexiones marítimas entre las islas en los archipiélagos españoles, junto con los enlaces entre la Península y Baleares y algunas ciudades del norte de África, son de gran importancia en el transporte de pasajeros por mar. Entre las rutas más destacadas se encuentra la que une Los Cristianos y San Sebastián de La Gomera en Canarias, la conexión entre Santa Cruz de Tenerife y el puerto de Las Nieves en Gran Canaria, que cuenta con una afluencia de más de un millón de pasajeros al año, debido a que ambas islas concentran más del 80% de la actividad económica y población del archipiélago.

En los últimos años, el tráfico de cruceros ha experimentado un crecimiento significativo en algunos puertos españoles, como el de Barcelona, que ha superado los 2,5 millones de pasajeros en un año, o los puertos de Baleares, que han alcanzado los 1,5 millones de pasajeros. Además, las autoridades portuarias de Canarias han visto un incremento en su actividad que supera el millón de pasajeros. Sin embargo, es importante destacar que el tráfico de pasajeros en los puertos españoles es muy estacional, concentrándose principalmente desde mediados de la primavera hasta octubre en las zonas del Mediterráneo y del Cantábrico, y desde octubre hasta la primavera en Canarias.

1.2. Principales fuentes de energía

Históricamente los buques mercantes fueron propulsados por vapor ya desde el siglo XIX, abasteciéndose de carbón para producirlo, pero este tipo de combustible acarrea varios problemas obvios a comparación de las alternativas actuales.

En primer lugar, los espacios destinados al almacenaje del carbón debían ser muy amplios y le restaban un considerable espacio de carga a las embarcaciones, haciéndolas menos eficientes. También cabe destacar que, al tener un poder calorífico inferior a cualquiera de los combustibles actuales, se requería mucho más volumen de combustible para desarrollar la misma labor. Además, resultaba mucho más difícil interrumpir la combustión que con los combustibles líquidos actuales con los que cortando el suministro es suficiente para terminar con la combustión.

Por todo ello, en los últimos 150 años, la propulsión naval ha tenido una notable transformación, pasando de la energía renovable (velas) al vapor (carbón), el fuelóleo pesado (HFO) y el gasóleo marino (MDO) y el gasóleo marino (MDO), siendo estos dos últimos combustibles de altas emisiones que son ahora la fuente dominante de energía para la propulsión en este sector. Durante este periodo, el rendimiento de los buques mercantes propulsados por motores diésel ha mejorado, con un rendimiento térmico cercano al 55% para los motores de baja velocidad. Por ejemplo, la ilustración 11 muestra que entre los años 1855 y 2006, la mejora de la eficiencia fue considerable.

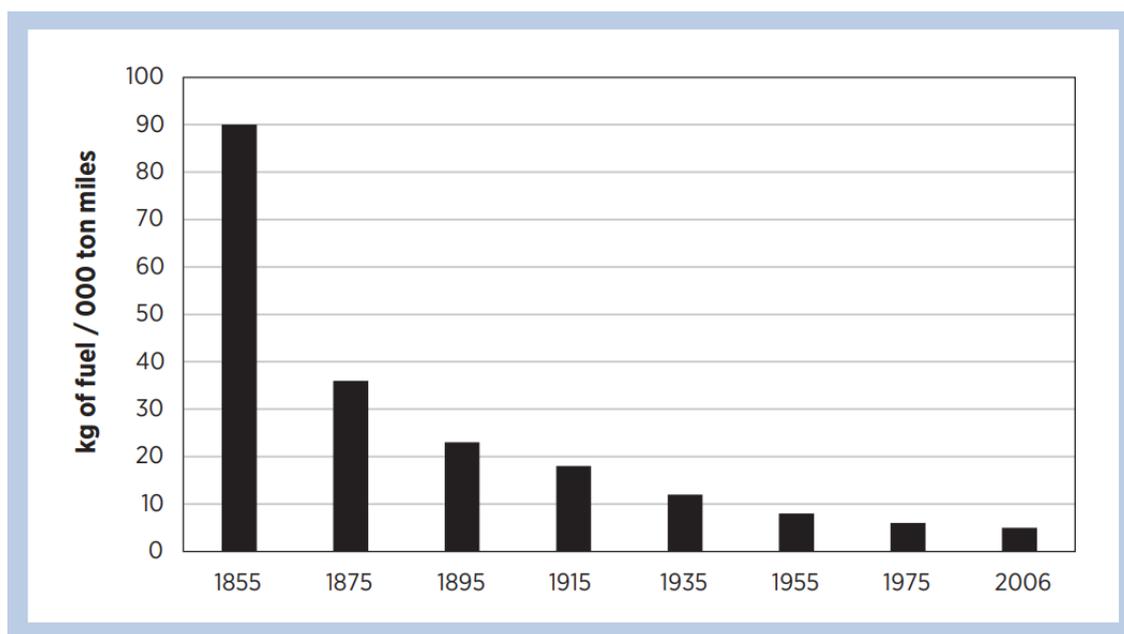


Ilustración 11: Evolución de la eficiencia de los buques mercantes

Entre los principales combustibles empleados en la actualidad en la industria marítima, se distinguen dos tipos principales: los combustibles **residuales** y los **destilados**.

Los primeros, como su propio nombre indica son productos de residuo del proceso de destilado en el cual se han extraído todos los productos aprovechables como la gasolina, el gasóleo, propano, nafta, butano, aceites lubricantes, etc., quedando un líquido denso y espeso difícil de manipular denominado fuelóleo pesado o, en inglés, **Heavy Fuel Oil (HFO)**. A pesar de ello, es en la actualidad el método más rentable de almacenar y transportar energía y es empleado fundamentalmente en buques de servicio oceánico en sus distintos preparados como el fuel oil marino; **Marine Fuel Oil (MFO)**, o el fuel oil intermedio; **Intermediate Fuel Oil (IFO)**.

Estos productos requieren ser tratados a bordo antes de ser utilizados para la combustión en procesos que generalmente consisten en calentarlos para disminuir su viscosidad; que suele ser de 380cSt o 180cSt, y en ocasiones también son filtrados antes de pasar a la cámara de combustión. Además, debido a las regulaciones actuales, los buques que los empleen no pueden entrar en las zonas de control de emisiones de sulfuros; *sulphur emission control areas* (SECA's), a menos que cambien a combustibles con contenido de azufre bajo como el diésel oil marino, **Marine Diesel Oil (MDO)** y el gasoil marino, **Marine Gas Oil (MGO)**.

Estos dos últimos obedecen al segundo tipo de combustibles marinos empleados en la actualidad, los destilados. Llamados diéseles o gasoils, son productos obtenidos en la refinería del petróleo crudo y son más ligeros, limpios y fáciles de utilizar, ya que por lo general, no necesitan de tantos tratamientos a bordo para su combustión. También por este motivo su precio es casi el doble del combustible residual y quedan relegados a buques pequeños, naves costeras y sistemas auxiliares como los motores eléctricos e hidráulicos del buque.

No obstante y debido a nuevas políticas ecológicas, se ha vuelto obligatorio emplear MDO o MGO para todo tipo de buques en ciertas zonas costeras donde está regulada la emisión de sulfuros a la atmósfera.

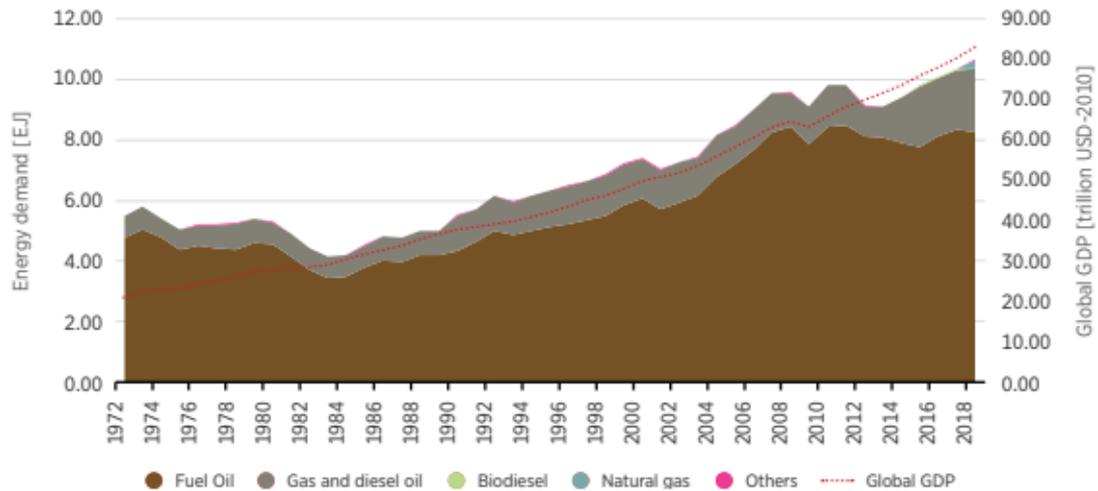


Ilustración 12: Demanda de energía de la industria marítima y PIB global

Como se muestra en la gráfica, el HFO y MDO han sido los combustibles más utilizados desde la transición del carbón allá por los años 20, cuando este tipo de combustibles líquidos se extendió ampliamente en la industria naval. Sin embargo y en general, se estima que el HFO representa aproximadamente actualmente el 80% del consumo de combustible marino en todo el mundo, mientras que el MDO representa alrededor del 20%.

Es importante destacar que, en los últimos años, ha habido un aumento en la utilización de combustibles más limpios, como el MDO y el gas natural licuado (GNL), debido a las regulaciones ambientales más estrictas y a la presión por parte de los consumidores y la sociedad en general para reducir las emisiones de GEI y mejorar la calidad del aire. Además, se están llevando a cabo esfuerzos para desarrollar y adoptar tecnologías y sistemas de propulsión más eficientes y menos contaminantes en la industria marítima que marquen el camino hasta las cero emisiones.

1.3. Emisiones producidas

Los buques son una de las fuentes principales de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. De acuerdo con la Organización Marítima Internacional (OMI), los barcos de alta mar emitieron más de 1.120 millones de toneladas de dióxido de carbono en el año 2007. Para tener una idea de su impacto, esta cantidad equivale a las emisiones de gases de efecto invernadero que más de 205 millones de vehículos harían al año.

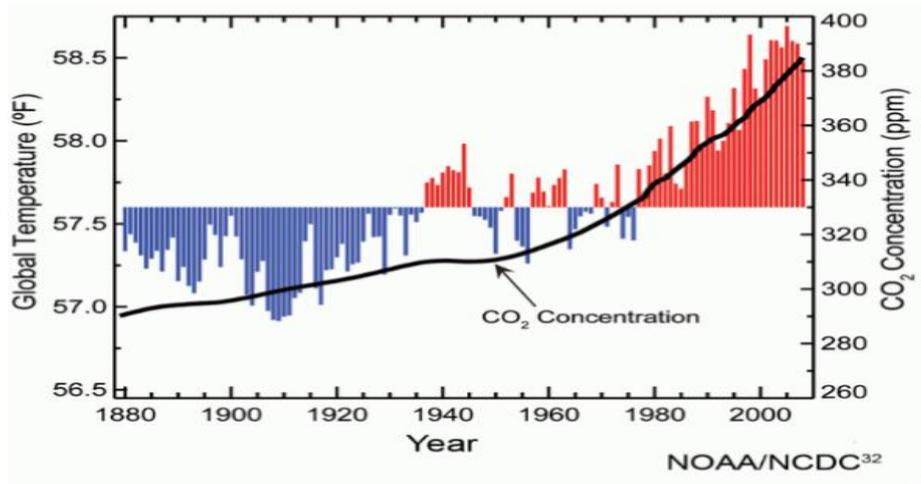


Ilustración 13: Evolución de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera entre 1880 y 2009

El aumento tan pronunciado de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera que se aprecia en la imagen 13, viene dado por el gran salto poblacional y económico, que ha generado la necesidad de quemar combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón para la producción de energía, transporte y la industria. Además, la deforestación y la degradación del suelo también han contribuido a la liberación de carbono en la atmósfera.

Asimismo, la actividad de la flota naval tiene un gran impacto en el aumento de las emisiones globales de dióxido de carbono, siendo responsable de **más del 3% de las emisiones de CO2**, con el agravante adicional de que esta cifra va en aumento debido al crecimiento anual de la industria naval, que ha sido del 5% en promedio en las últimas tres décadas.

En contraste, datos de la UE reflejan que; aun con los objetivos alcanzados recientemente en materias de ecologismo, la industria marítima sigue produciendo el 13,5% de las emisiones GEI del continente, después de la aviación, pero muy por detrás del transporte por carretera.

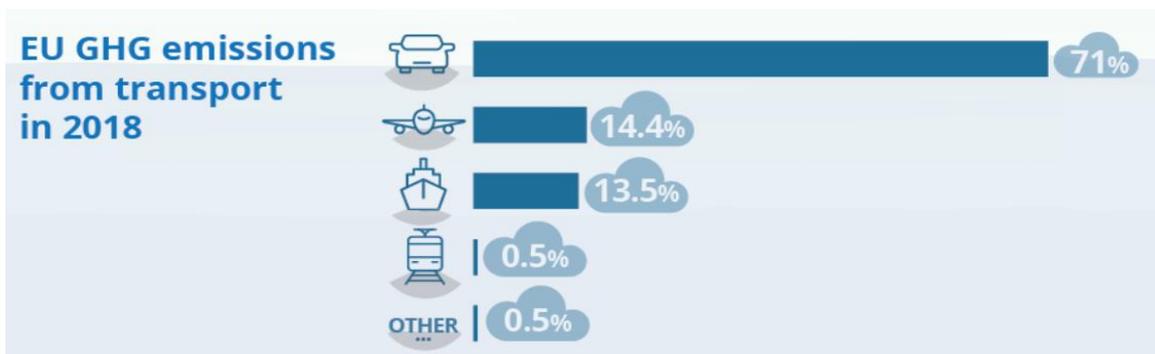


Ilustración 14: emisiones de GEI de medios de transporte en 2018

La Organización Marítima Internacional (OMI) ha emitido una advertencia sobre las emisiones de dióxido de carbono generadas por los buques. Si no se toman medidas para reducir estas emisiones, se estima que podrían alcanzar las 1.480 millones de toneladas para el año 2020. Esta cantidad equivaldría a poner en circulación aproximadamente 65 millones de coches nuevos, lo cual tendría consecuencias significativas y perjudiciales para el medio ambiente.

Sin embargo, además de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), los buques emiten otros gases de efecto invernadero como el óxido nitroso (N₂O), material particulado como hollín o polvo y óxidos de nitrógeno (NO_x). Estos contaminantes tienen un impacto significativo en el cambio climático, ya sea directamente al actuar como agentes de retención de calor en la atmósfera, o indirectamente al contribuir a la generación de más gases de efecto invernadero.

Datos de 2018 revelan que, de los gases emitidos a la atmósfera en aquel año; el 24% de óxidos nitrosos, el 24% de óxidos y el 2,5% del material particulado fueron provenientes del sector del transporte marítimo, incluyéndose en el estudio tanto a la navegación internacional como a la de cabotaje.

Las emisiones que generalmente son menos tomadas en cuenta son el material particulado, que se encuentran clasificadas en función de su diámetro. Las más abundantes en las emisiones provenientes de motores marinos son las PM₁₀ y PM_{2.5}; cuyos diámetros son de 10 y 2.5 micras respectivamente. También existen las llamadas partículas ultrafinas PM₁, las cuales debido a su menor diámetro representan un riesgo mayor para la salud, aunque estas no son tan frecuentes entre las emisiones de la combustión.

La peligrosidad de estas partículas tóxicas reside en que cuanto menor es su diámetro, mayor dificultad encuentra el sistema inmunitario para “filtrarlas”, pudiendo las PM₁ llegar hasta los alvéolos y generar enfermedades graves ya que muestran una mayor toxicidad cardiovascular. En la imagen posterior se muestra el alcance que tienen este tipo de partículas en el sistema respiratorio de un ser humano:

Estas partículas finas en suspensión, comúnmente conocidas como hollín, se generan debido a la combustión incompleta de combustibles fósiles como el petróleo y el carbón. Además, los motores antiguos y la falta de mantenimiento adecuado pueden contribuir a una combustión incompleta, aumentando la emisión de estas partículas dañinas.

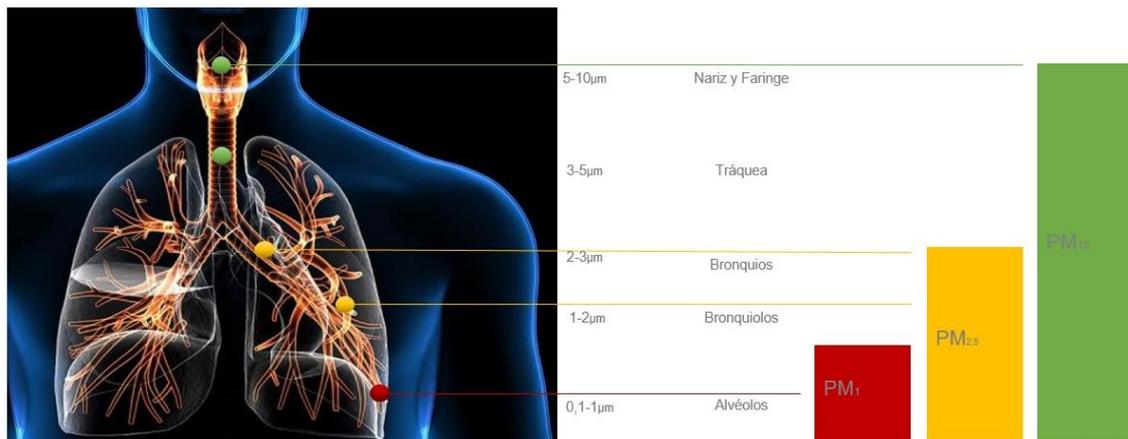


Ilustración 15: Clasificación de las partículas por tamaño según ISO 16890

Datos aportados por el gobierno de España revelan que, en 2016 en el territorio nacional, las emisiones del sector incluso superaron los datos globales con un 40% de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx), el 44% de las emisiones de óxidos de azufre (SOx), y el 22% de las emisiones de partículas finas.

El transporte marítimo, aunque a menudo inadvertido, representa una fuente importante de contaminación atmosférica para las áreas costeras y ciudades portuarias. Esta contaminación, que ocurre en alta mar, plantea una grave amenaza para la salud pública y el medio ambiente. Estudios científicos respaldados por la Comisión Europea revelan que las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de los barcos resultan en aproximadamente 50.000 muertes prematuras y un costo sanitario de alrededor de 60.000 millones de euros anuales en la Unión Europea. Como se aprecia en el siguiente mapa, las zonas costeras europeas altas cantidades de emisiones provenientes de la industria marítima, destacando el nivel de contaminación en la costa Mediterránea.



Ilustración 16: Contaminación producida por la industria marítima en Europa

Y en relación a la ilustración 6, muéstrase el siguiente gráfico, en el cual se distingue la cantidad de emisiones por tipo de buque y que muestra que las emisiones de gases contaminantes varían según el tipo de embarcación y el tipo de combustible que se utiliza. En general, los más grandes y antiguos suelen emitir mayores cantidades de contaminantes, pero los buques portacontenedores y los de crucero pueden ser más contaminantes que otros tipos de debido a su tamaño y al uso de combustibles pesados menos refinados.

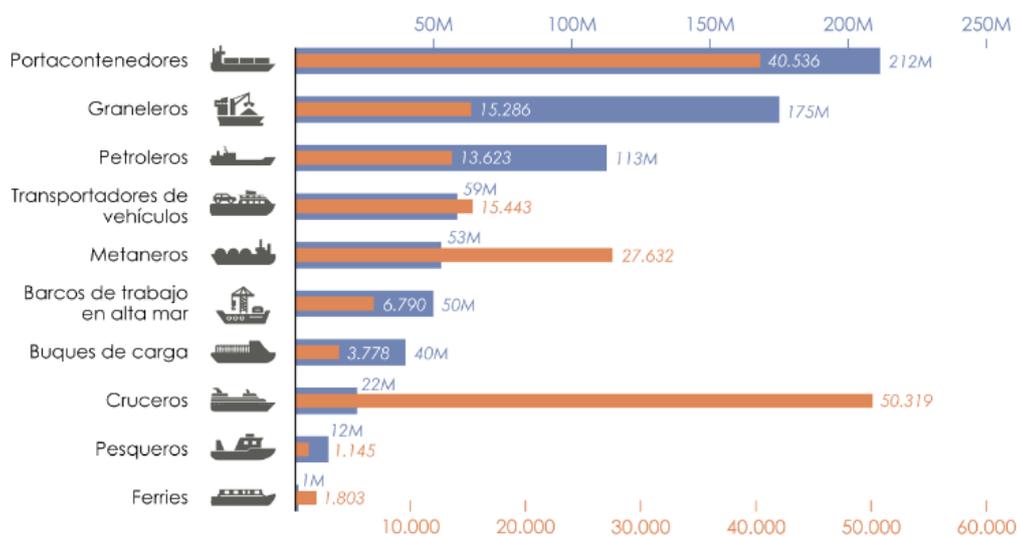


Ilustración 17: Emisiones de CO2 totales por tipo de flota y medidas por embarcación

2. Legislaciones ambientales acordadas internacionalmente

Los organismos internacionales desempeñan un papel mediador entre las grandes empresas marítimas y los intereses ecológicos globales para la reducción de las emisiones de los buques. Algunas de las principales organizaciones son:

- **Organización Marítima Internacional (OMI):** es la agencia de las Naciones Unidas responsable de regular el transporte marítimo internacional OMI ha adoptado una serie de regulaciones para disminuir las emisiones del sector, incluyendo la limitación de las emisiones de azufre y la introducción de zonas con emisiones restringidas.
- **Comisión Europea (CE):** es el órgano ejecutivo de la Unión Europea y tiene un papel importante en la regulación del transporte marítimo en la región. La CE también ha respaldado las regulaciones en cuanto a las emisiones de sulfuros a la atmósfera que ha propuesto la OMI prestando su jurisdicción a las nuevas medidas.
- **Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA):** ha desarrollado una serie de iniciativas para reducir las emisiones de los buques,

incluyendo el Programa Global de Limpieza del Aire Marino y el Programa de Acción Global para la Reducción de las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del Transporte Marítimo. También se ha sumado a las iniciativas globales de aprovechamiento energético tanto en el ámbito marítimo como en lo ajeno a este sector.

En general, estos organismos internacionales establecen normas y regulaciones para limitar las emisiones de los buques y promueven prácticas más sostenibles y eficientes en el transporte marítimo. Sin embargo, la implementación y cumplimiento de estas regulaciones sigue siendo un desafío importante y un dilema de actualidad en el que no todas las partes negociadoras están de acuerdo en que camino tomar para el futuro.

2.1. IMO 2020

El Acuerdo sobre Emisiones de la Organización Marítima Internacional (OMI) 2020, también conocido como la "Regulación 14" del Anexo VI del Convenio Internacional para la Prevención de la Contaminación por los Buques (MARPOL), entró en vigor el 1 de enero de 2020.

El propósito de la regulación de emisiones en el transporte marítimo es reducir la contaminación y minimizar su impacto en el medio ambiente. Esta medida es un paso importante hacia la sostenibilidad y requiere que todas las empresas navieras ajusten sus flotas para cumplir con las normas establecidas. Vale la pena destacar que el combustible principal utilizado en los buques de transporte marítimo es el fuel pesado, que contiene azufre en alto porcentaje, y su combustión emite óxido de azufre, que es perjudicial para la salud respiratoria de los seres vivos.

A través de esta, se obliga a todos aquellos buques que operan fuera de las Zonas de Control de Emisiones (ECAs) a emplear combustibles cuyo contenido máximo en azufre sea del 0,5%, en contraste con el 3,5% que hasta ese entonces era permitido. Según informes de la OMI esta regulación supone una caída del 70% en las emisiones totales anuales de óxidos de azufre, o lo que es lo mismo, 8.5 toneladas métricas de SOx.

Muéstrese a continuación, el siguiente diagrama donde se detalla la evolución del porcentaje en azufre de los combustibles marinos desde comienzos de siglo, tanto globalmente como en las Zonas de Emisiones Controladas:

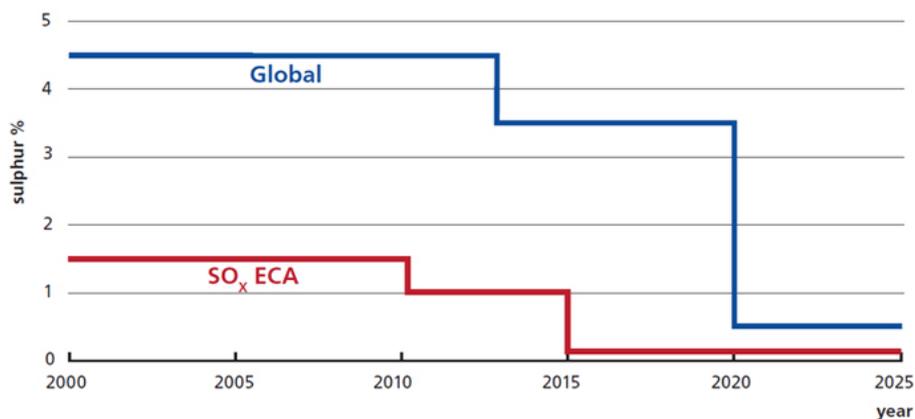


Ilustración 18: Evolución del porcentaje en azufre de los combustibles marinos

Como resultado de la medida, organismos internacionales esperan una disminución en problemas de salud como el asma, los accidentes cerebrovasculares, el cáncer de pulmón y las enfermedades cardiovasculares y prevenir la lluvia ácida y la acidificación de los océanos. Asimismo, promoverá la mejora de los cultivos, los bosques y las condiciones de las especies acuáticas.

Igualmente, la OMI ha establecido objetivos para reducir las emisiones de GEI en un **40% para 2030**; que al igual que la Unión Europea marcan esta reducción para el final de la década, y un ambicioso 50% para el año 2050.

2.2. Zonas de Control de Emisiones

Las Zonas de Control de Emisiones, denominadas ECAs por sus siglas en inglés (Emission Control Areas), surgen a raíz de una iniciativa de la OMI por establecer un régimen de control de emisiones más estricto para ciertas zonas marinas en el año 2005. Concretamente, se ha establecido un **límite del 0,10% para el contenido de azufre** en los combustibles marinos, además de otros límites en cuanto a partículas y óxidos de nitrógeno (NO_x).

La comisión encargada logró el consenso de varios países para aprobar la enmienda al Anexo IV del Convenio Internacional para la Prevención de la Contaminación por los Buques (MARPOL) por el cual se establecían regulaciones inéditas hasta la fecha en las siguientes zonas:

1. El Mar Báltico, donde se limita solamente las emisiones de óxidos de azufre (SO_x).
2. El Mar del norte, también únicamente para los SO_x.

3. Costa este y oeste de Norteamérica y el archipiélago hawaiano, limitando las emisiones de óxidos nitrosos y de azufre, además del material particulado.
4. El Mar Caribe de los Estados Unidos, referente a las costas puertorriqueñas y donde se aplican las mismas regulaciones que al resto del litoral norteamericano.

Véase en los siguientes mapas las **ECA vigentes en la actualidad**:



Ilustración 19: Zonas ECA en América

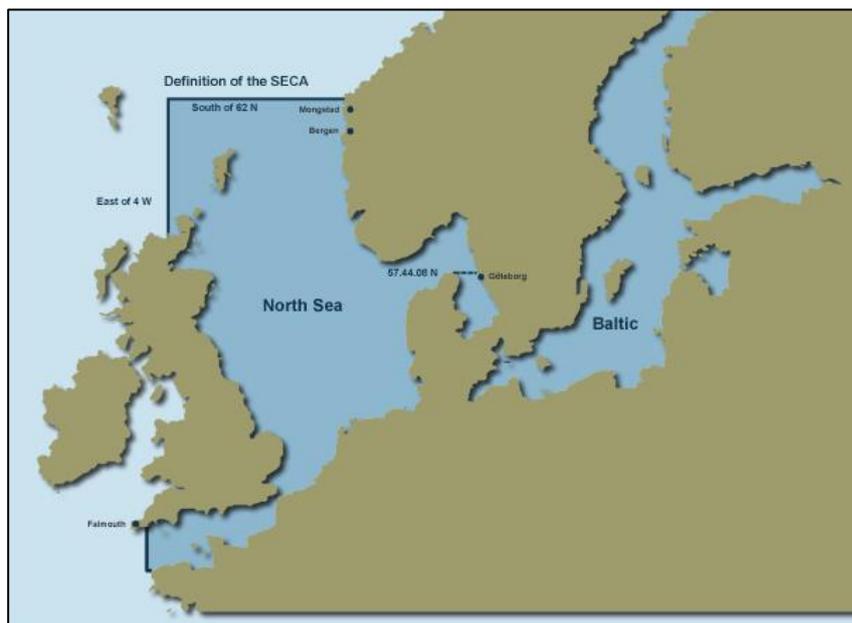


Ilustración 20: Zonas ECA en Europa

Las primeras zonas en establecerse fueron las del Mar Báltico y el Mar del Norte en 2006 y que atendieron a las iniciativas iniciales de la Organización Marítima Internacional para regular la cantidad de emisiones. Posteriormente, en el año 2012, se aprobaron las regulaciones para el continente americano y fueron ampliadas las emisiones reguladas; pasando a incluir el material particulado y los óxidos nitrosos entre ellas.

A raíz de la creación de este tipo de zonas marítimas y también debido a la concienciación de la escena internacional en cuanto al calentamiento global, el interés por establecer nuevas zonas con emisiones controladas ha sido creciente. De hecho, en diciembre de 2022 tuvo lugar la 79ª reunión del Comité de Protección del Medio Marino (MEPC 79) en la cual se acordó, entre otros temas, la designación del Mar Mediterráneo como ECA y que limitará la emisión de óxidos de azufre al 0,10% y también las emisiones de material particulado. De esta forma el Mar Mediterráneo se sumará al resto de Áreas de Control de Emisiones, siendo la quinta en hacerlo.

Se espera que la modificación al Anexo VI de MARPOL entre en vigor en el 1 de mayo de 2024 y un año después, el 1 de mayo de 2025, se comience a aplicar el nuevo límite de azufre.

A continuación, un mapa de la **nueva ECA del Mediterráneo**:



Ilustración 21: Nueva zona ECA del Mar Mediterráneo

2.2.1. Regulación 13 – Control de emisiones de NOx

Las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) no quedan excluidas de las legislaciones anticontaminantes de los organismos internacionales. Concretamente, están reguladas en la Regulación 13 del Anexo VI de MARPOL donde se han establecido tres categorías distintas con diferentes niveles de emisión permitidas en función de la fecha de construcción del buque. Estas son la IMO Tier I, Tier II y Tier III y cada una de ellas limita las emisiones a un valor específico, tal y como se muestra en el siguiente gráfico:

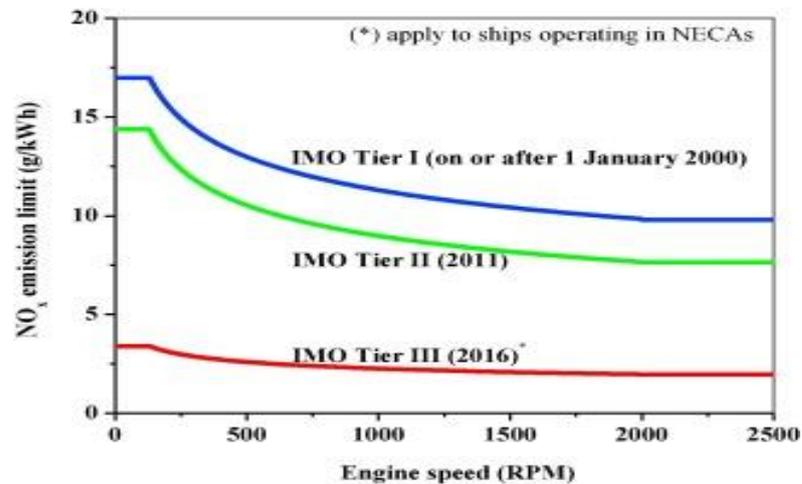


Ilustración 22: Limitaciones IMO Tier I, Tier II y Tier III

- **IMO Tier I:** Fue introducido en el año 2000 y establece límites de emisiones de NOx de 17 gramos por kilovatio hora (g/kWh) para motores con una potencia superior a 130 kilovatios (kW) y una velocidad de rotación nominal superior a 130 revoluciones por minuto (rpm). Para los motores con una potencia inferior a 130 kW, el límite va de 17 hasta 9.8 g/kWh.
- **IMO Tier II:** Fue introducido en el año 2011 y establece límites de emisiones de NOx más estrictos que los de Tier I. Los límites varían según la velocidad y la potencia del motor, pero en general se sitúan entre los 14.4 y 7.7 g/kWh.
- **IMO Tier III:** Fue introducido en el año 2016 y establece límites de emisiones de NOx aún más estrictos que los de Tier II. Estos límites se aplican a los buques que transitan por zonas de control de emisiones de NOx designadas por la OMI. Los límites de emisiones de NOx en Tier III varían según la potencia del motor y se sitúan alrededor de los 3.4 g/kWh.

Las **Zonas de Control de Emisiones de NOx** se ubican en el Mar Báltico, el Mar del Norte, la costa este de América del Norte y las islas del Canal de la Mancha y se muestran en el mapa 23 a continuación:



Ilustración 23: Zonas de Control de Emisiones de NOx

3. Inversión actual en alternativas

Como reacción a las nuevas regulaciones en torno a las emisiones permitidas, se han tenido que buscar alternativas para que la navegación siga siendo rentable económicamente y al mismo tiempo cumplir con lo establecido, popularizando sistemas de lavado de gases de escape como los llamados 'scrubbers' o los sistemas SCR; de sus siglas en inglés Selective Catalytic Reduction.

Estos sistemas, se han convertido en una opción atractiva para aquellas navieras que no desean cambiar completamente a combustibles más limpios de bajo contenido en azufre o gas licuado ya que, permiten a los buques seguir empleando combustibles con un porcentaje de azufre mayor al 0.5% en masa mientras que las emisiones procedentes de esa combustión cumplen la legislación actual. De hecho, la propia enmienda de la MARPOL ya preveía la popularización de este tipo de sistemas puesto que fueron incluidos en los puntos de la norma, prohibiendo explícitamente a todos aquellos buques sin sistemas de depuración de gases a bordo el transporte de fueloil 'no apto' con fines de ser usado para la propulsión de la embarcación o en los sistemas auxiliares de la misma.

Además, la nueva legislación ha popularizado los combustibles marinos más limpios, como el VLSFO (Very Low Sulphur Fuel Oil), el ULSHFO (Ultra Low Sulfur Heavy Fuel Oil) y el GNL (Gas Natural Licuado). El VLSFO y el ULSHFO son versiones más limpias del tradicional HFO (Heavy Fuel Oil), con un contenido de azufre de 0,5% y 0,1%, respectivamente. El GNL es una alternativa aún más limpia, ya que produce menos emisiones de dióxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y partículas.

3.1. Sistemas SCR marinos

En primer lugar, los sistemas SCR marinos o sistemas de Reducción Catalítica Selectiva, son una tecnología utilizada para **reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx)** en los motores marinos convirtiéndolos en agua y nitrógeno diatómico, que son gases mucho más limpios. De hecho, en la industria automotriz se lleva empleando por casi dos décadas una solución similar, el denominado AdBlue, que apareció para neutralizar las emisiones producidas por los vehículos diésel que quemaban mezclas menos homogéneas que los vehículos de gasolina, generando así altas emisiones de NOx.

En la práctica, estos equipos operan inyectando una solución de urea y agua en la corriente de gases de escape en combinación con una unidad catalizadora logrando reducir en más del 80% las cantidades de NOx en los gases de escape. Se trata de un sistema de tratamiento de gases independiente y adicional el cual no interfiere con el diseño básico del motor ni con el proceso de combustión por lo que resulta sencillo incorporarlo en las embarcaciones para adaptarse a la nueva Regulación 13 del Anexo VI de MARPOL referente a la emisión de óxidos de nitrógeno que producen los motores marinos que emplean combustibles pesados.

La reacción química que se produce es la siguiente:

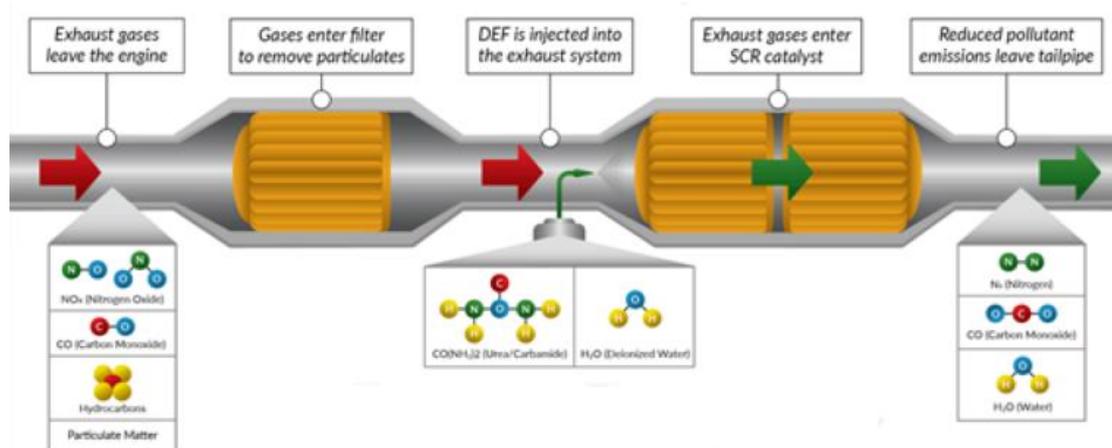
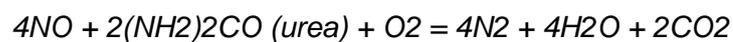


Ilustración 24: funcionamiento sistema SCR marino

Los SCR se clasifican en 2 tipos según la configuración: pueden ser instalados entre el colector de gases de escape y el turbocompresor, o bien entre el turbocompresor y la caldera de gases de escape, siendo de alta o baja presión respectivamente.

En aquellos sistemas de alta presión la temperatura de los gases de escape debe mantenerse entre 300 y 400 grados centígrados, lo que puede resultar complicado especialmente cuando se trata de motores que trabajan a bajo régimen. Por lo tanto, en motores de dos tiempos la ubicación más común y lógica de los sistemas SCR es antes del turbocompresor a fin de aumentar el rango de operación del dispositivo sin dejar tiempo para que la temperatura de los gases disminuya.

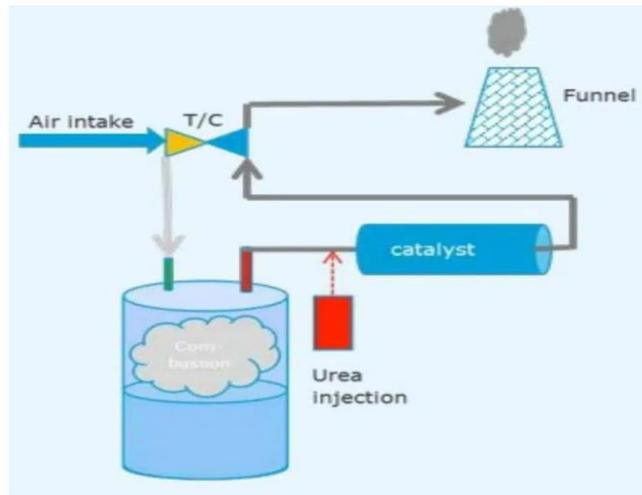


Ilustración 25: Sistema SCR de alta presión

Por otra parte, en los SCR de baja presión, el reactor se ubica después de la turbina compresor y puede ser necesario un sistema adicional para precalentar la corriente de gases de escape para lograr la temperatura suficiente para la reacción catalítica. Por tanto, esta ubicación del SCR supone un gasto adicional de energía para el precalentamiento.

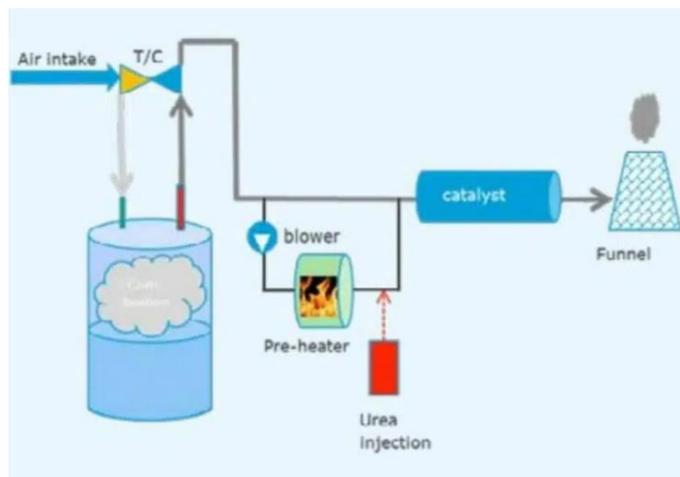


Ilustración 26: Sistema SCR de baja presión

En definitiva, el principal beneficio de este tipo de sistemas reside en poder cumplir la legislación actual sin tener que realizar grandes cambios estructurales en el buque, ni utilizar combustibles más limpios que resultan mucho más costosos que los combustibles pesados, logrando reducir las emisiones de NOx entre un 60% y 90%.

Sin embargo, existen también una serie de desventajas en su uso; como son la elevada inversión inicial requerida, las limitaciones con cargas de motor bajas, la instalación de los tanques de urea; así como los costos del propio reactivo, y el mantenimiento que deben recibir los elementos del sistema de depuración. Se calcula que la vida útil de algunos elementos del

catalizador es de 1000 horas y el de los sensores de NOx de unas 2000 aproximadamente, por lo que los costos en mantenimiento son un factor a tener en cuenta al decantarse por un sistema de estas características.

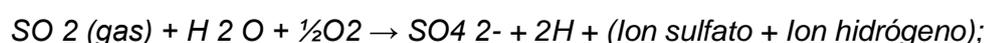
3.2. Scrubbers

Entre los scrubbers se diferencian distintos tipos según la manera en que se depuran los gases, que son los depuradores húmedos por una parte y los secos por otra. Respecto a los segundos, estos **emplean gránulos de cal hidratada para eliminar el azufre** por lo que se debe disponer a bordo de medios para manejar el producto a granel; que ocupan un espacio significativo, lo cual sumado al alto costo de los productos reactivos, hace que en la práctica las navieras se decanten por los otros tipos de sistemas de depuración.

Dentro de un scrubber o depurador húmedo, los gases de escape son rociados con agua de mar o agua dulce con aditivos químicos; como sosa cáustica (NaOH) y/o caliza (CaCO₃), a través de boquillas que la distribuyen de manera eficiente. Comúnmente la mezcla de gas se hace pasar por un tubo de Venturi para acelerar el flujo y que la depuración sea más efectiva para luego entrar al escape donde la combinación de los gases con los reactivos forma ácido sulfúrico de naturaleza altamente corrosiva y que es neutralizado al pasar por el agua de mar alcalina. El agua de lavado se descarga en mar abierto luego de haber sido tratada para eliminar las impurezas y asegurando; tal y como exigen las normas MARPOL, que el pH no sea demasiado bajo.

No obstante, es sabido que la alcalinidad del agua marina depende de múltiples factores como la distancia a tierra, la actividad volcánica submarina, la vida marina presente, y un largo etc. Por ello, es bastante común que a bordo de un mismo buque; generalmente en aquellos que no tienen una ruta fija, se disponga de dos tipos de depuradores húmedos, de circuito abierto o cerrado.

Los de circuito abierto se refiere a aquellos en los que los gases de escape son tratados únicamente con agua de mar, sin ser necesarios productos químicos para el cumplimiento de la tarea. Suele ser un sistema bastante efectivo en la práctica, pero que requiere de una alta capacidad de bombeo para surtir al depurador las grandes cantidades de agua de mar requeridas. Este proceso involucra las siguientes reacciones químicas:



Tras el lavado de los gases, las emisiones resultantes son únicamente dióxido de carbono y vapor de agua y la forma de realizar la tarea a bordo resulta mucho más sencilla y necesita de menos espacios destinados a los elementos del sistema purificación de gases de escape que otro tipo de purificadores. Sin embargo y como ya se ha mencionado anteriormente, existen lugares del planeta donde la temperatura y la composición del agua de mar hace que esta no pueda ser utilizada para la tarea, como por ejemplo el mar Báltico, donde los niveles de salinidad no son suficientes.

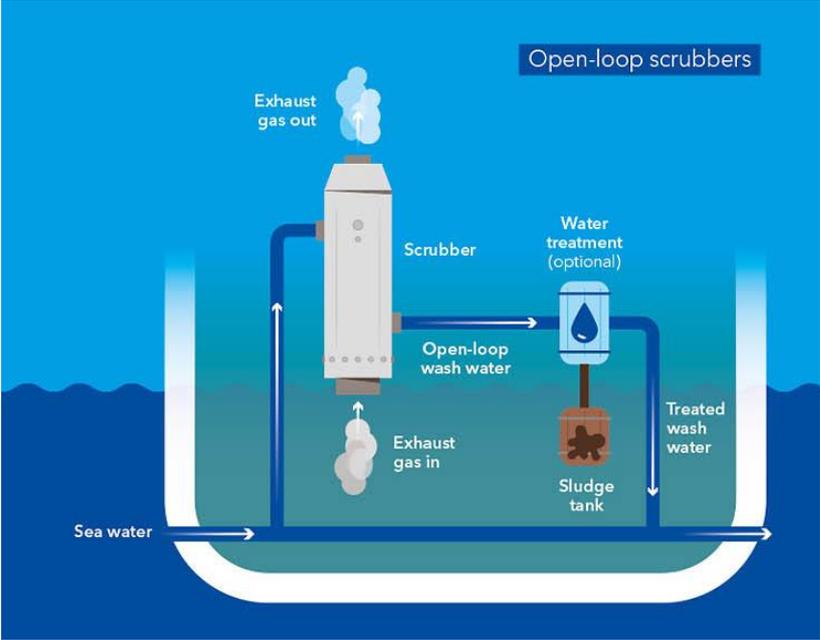


Ilustración 27: Scrubber de circuito abierto

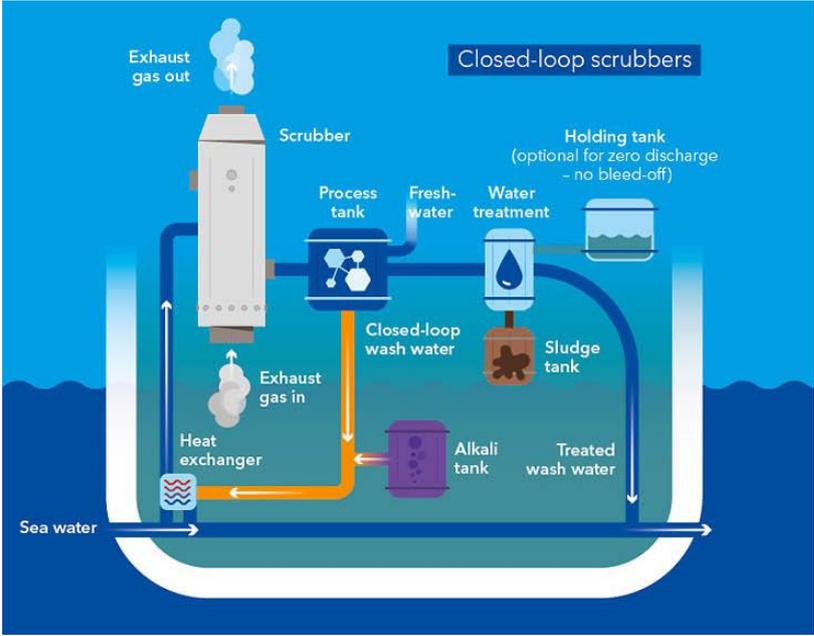
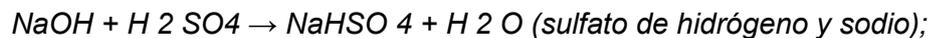
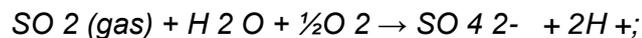
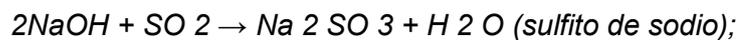


Ilustración 28: Scrubber de circuito cerrado

En estas áreas el método utilizado se denomina de circuito cerrado, donde la depuración de los gases se realiza con agua dulce tratada con, generalmente, hidróxido de sodio (NaOH). Los buques deben contar con tanques de agua dulce o con sistemas para poder generarla a partir del agua de mar a bordo, además de los reactivos a granel y los procedimientos para la disolución de los mismos. Este tipo de scrubber requiere casi la mitad del volumen de agua de lavado por lo que no se necesita de tanta capacidad de bombeo, pero esta agua no puede ser liberada al mar por lo que se sana, separando el residuo, y se vuelve a utilizar en el depurador.

En todo este proceso intervienen los siguientes procesos químicos:



Después de esta secuencia de reacciones, los gases liberados a la atmósfera consisten en agua y sulfato de sodio, el cual resulta inofensivo para el medio ambiente.

Algunas navieras que rehúsan de usar combustibles más limpios por seguir usando este sistema de purificación de gases incluso utilizan ambos sistemas simultáneamente, los llamados sistemas híbridos de lavado de gases que ocupan mucho espacio a bordo pero que por contraparte ahorran a los armadores los altos costes de combustibles bajos en carbono.

3.2.1. Problemas con las descargas de aguas de lavado

La cantidad de buques equipados con esta tecnología no ha parado de crecer desde la aparición de las nuevas restricciones ambientales. Concretamente, en 2020 la Organización Marítima Internacional estimaba en 3600 los buques con scrubbers, pero esta cifra ha ascendido a 4300 en la actualidad y es a raíz de este que nace la preocupación entorno al daño que producen las descargas de las aguas de lavado.

A pesar de las aguas procedentes del lavado de los gases de escape son tratadas antes de su descarga en alta mar, estas siguen siendo más ácidas que el agua de mar circundante además de contener hidrocarburos aromáticos policíclicos, partículas, nitratos y

metales pesados como níquel, plomo, cobre y mercurio. Por ello, estas aguas resultan tóxicas para algunos organismos marinos y pueden empeorar la calidad del agua.

Las estadísticas reflejan que cerca del 80% de las descargas ocurren dentro de las 200 millas náuticas de la costa, por lo que la contaminación que generan se acaba concentrando en puntos críticos con mucha actividad marítima como el Mar Báltico, el Mar del Norte, el Mar Mediterráneo, el Estrecho de Malaca y el Mar Caribe. Igualmente, esta problemática se da en Zonas Marinas Especialmente Sensibles (ZMES), incluida la Gran Barrera de Coral, la cual recibe 32 millones de toneladas de agua de lavado de los depuradores y que únicamente representa el 5% de los 665 millones de toneladas que reciben las ZMES anualmente.

En los siguientes mapas se muestra la distribución de las descargas de aguas de lavado de gases de escape, focalizándose en el segundo en las costas españolas, donde destaca la costa andaluza mediterránea que, debido al alto tráfico marítimo concentrado en la zona, recibe anualmente grandes cantidades de aguas de lavado.

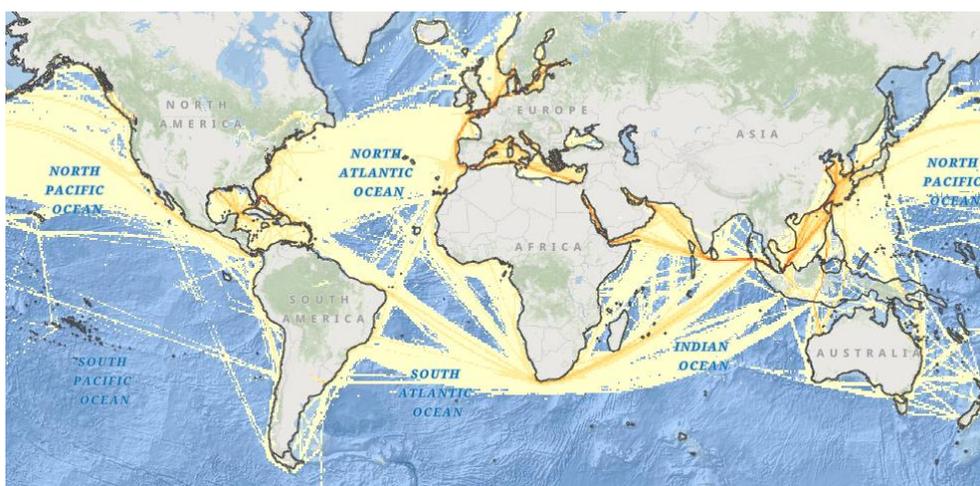


Ilustración 29: Distribución mundial de las descargas de aguas de lavado de gases de escape

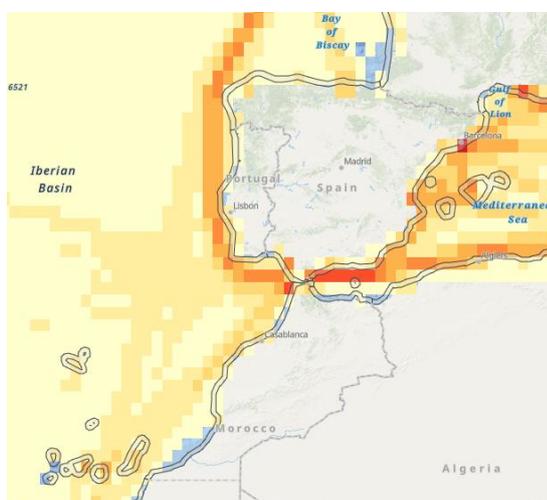


Ilustración 30: Distribución en España de las descargas de aguas de lavado de gases de escape

Es por esto que varios gobiernos ya han adoptado medidas preventivas que regulan e incluso prohíben el uso de scrubbers en sus puertos, aguas territoriales y mares territoriales por lo que para el futuro próximo se prevén varios dos escenarios posibles. En el primero, todos los países prohibirían el vertido de aguas de lavado de gases en sus aguas; dificultando mucho la logística de la gestión de estas aguas de lavado a bordo, mientras que en el segundo escenario sería la propia Organización Mundial Internacional la que prohibiría el uso de depuradores de este tipo para cumplir con las regulaciones.

Ante el actual panorama actual que resulta algo incierto sobre el futuro que le depara a este tipo de depuradores de gases de escape, son cada vez más las navieras que vienen invirtiendo en combustibles más limpios como los ULSFO (Ultra Low Sulphur Fuel Oil), VLSFO (Very Low Sulphur Fuel Oil); derivados del tradicional fuelóleo pesado, o incluso en Gas Natural Licuado (GNL).

3.3. Combustibles con bajo contenido de azufre

Como reacción a las regulaciones sobre emisiones de azufre a la atmosfera por el MARPOL Anexo VI, en los últimos años se han popularizado los combustibles con bajo contenido en azufre derivados del convencional HFO que hasta ahora era utilizado por la amplia mayoría de buques mercantes. Esto son los ULSFO (Ultra Low Sulphur Fuel Oil), VLSFO (Very Low Sulphur Fuel Oil) y LSFO (Low Sulphur Fuel Oil).

- **ULSFO (Ultra Low Sulphur Fuel Oil):** se refiere a aquellos en los que el contenido de azufre en masa es muy bajo, generalmente por debajo del 0,1% en masa. Comúnmente es utilizado por buques que operan en áreas de control de emisiones de azufre, las SECAs.
- **VLSFO (Very Low Sulphur Fuel Oil):** son aquellos con un contenido en azufre reducido, pero ligeramente superior al de los ULSFO con un máximo marcado por la OMI de 0,5% en masa. Permite al buque cumplir los estándares de emisión de azufre sin necesidad de emplear sistemas adicionales.
- **LSFO (Low Sulphur Fuel Oil):** este es un término general referido a todos los combustibles marinos con un porcentaje en azufre reducido pero que no llega al nivel de los dos mencionados anteriormente. Estos suelen tener un porcentaje menor al 1%, por lo que en aquellos buques que lo empleen tendrán que emplear sistemas de purificación de gases de escape para alcanzar los niveles que la nueva legislación exige.

Además de poder cumplir con la legislación, otra ventaja significativa de este tipo de combustibles es que se pueden emplear en motores de combustión interna convencionales

únicamente realizando pequeños ajustes en los inyectores y en los sistemas de filtración de combustible. Esto es debido a que la principal diferencia entre estos combustibles y el fuelóleo pesado tradicional reside en su viscosidad, que, por tener menor contenido en azufre y menor densidad, es de en torno a 100 cSt mientras que la del HFO suele oscilar entre los 500 cSt y los 700 cSt. El HFO, siempre necesita ser precalentado antes de ser pulverizado en la cámara de combustión para reducir su viscosidad, por lo que empleando combustibles como los ULSFO, VLSFO y LSFO el buque también ahorra energía ya que no es necesario reducir tanto su viscosidad.

Uno de los motivos principales que hace que muchas navieras rehúsen de este tipo de combustibles más limpios es su elevado costo, ya que; aunque este varía dependiendo de factores como la ubicación geográfica, la oferta y la demanda, los costos de producción y transporte, los impuestos aplicados y las distintas regulaciones locales, por norma general, se calcula que los combustibles bajos en azufre son entorno a un 30% a 50% más caros que el HFO utilizado históricamente.

Datos de marzo de 2022, fecha marcada por el inicio de la invasión rusa sobre suelo ucraniano, desvelan que en los 20 puertos que más combustible suministran del mundo se alcanzó el máximo histórico de 1.125,50 dólares por tonelada de combustible con bajo contenido en azufre. Nunca desde el comienzo de la comercialización de los ULSFO y VLSFO había existido tanta diferencia de precio respecto del HFO, que llegó a costar 397 dólares más por tonelada.

Véase en el siguiente gráfico la subida histórica de los precios del combustible marcados por el acontecimiento de la guerra en Ucrania:

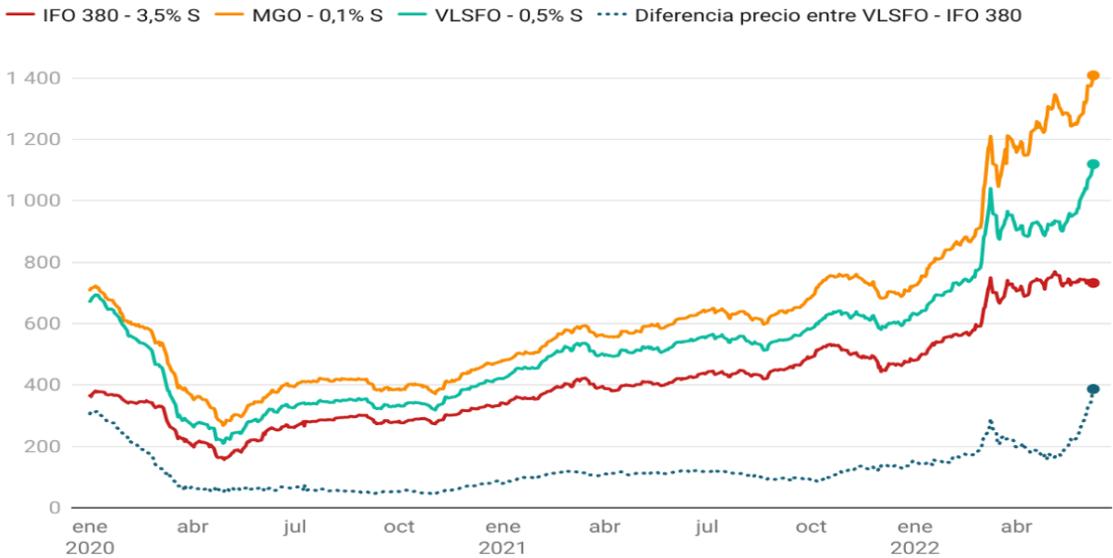


Ilustración 31: Precio de los combustibles marinos 2020-2022

No obstante, en la actualidad el mercado de los 'bunkers' se ha estabilizado, aunque permanece en valores altos a comparación de los precios por tonelada de 2020, existiendo aun una diferencia de precio de casi 100 dólares por tonelada entre los combustibles más limpios y los convencionales. En los siguientes gráficos se muestran los valores actuales, mayo de 2023, del VLSFO (Very Low Sulphur Fuel Oil) y el IFO380, que corresponde con el HFO:

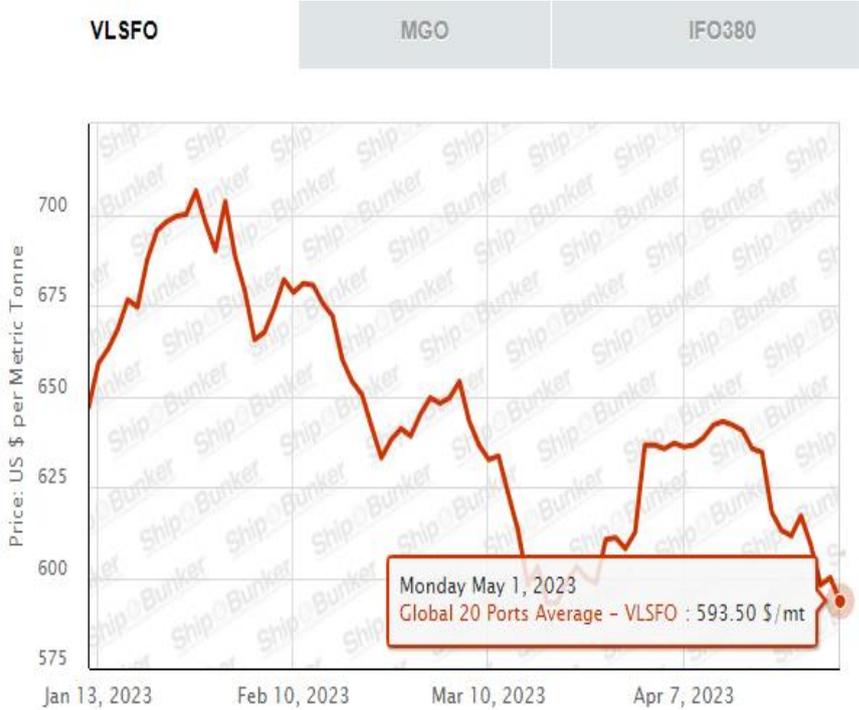


Ilustración 32: Precio Very Low Sulphur Fuel Oil



Ilustración 33: Precio fuelóleo pesado

4. Vías para la descarbonización de la industria marítima

La descarbonización de las industrias es fundamental para hacer frente al cambio climático y sus consecuencias, ya que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por la actividad industrial son una de las principales causas del calentamiento global y del cambio climático. Este último es el causante de la subida del nivel del mar, la acidificación de los océanos, el aumento de las temperaturas, sequías, etc.

Además, los problemas ambientales derivados de la emisión de gases contaminantes a la atmósfera suponen un alto riesgo para la salud pública, ya que los gases producidos en la actividad industrial pueden tener graves consecuencias sobre la salud humana, pudiendo generar enfermedades respiratorias, cardiovasculares e incluso cánceres de muchos tipos; desde cáncer de pulmón hasta cánceres de laringe y ovario, según informa la UE. De hecho, a la contaminación se le atribuyen más de 30 000 muertes anuales solamente en España, la mayoría de estas a causa de las partículas PM2.5.

Por otra parte, la descarbonización de la industria supondría un alivio sobre el uso intensivo de los recursos naturales del planeta; lo cual beneficiaría enormemente a la humanidad puesto que aseguraría su futuro a largo plazo ya que, como es sabido, estos recursos naturales presentes en el planeta son finitos y no es viable una dependencia energética basada en estos. Lograr esta conversión en el medio plazo es un reto que se está combatiendo mediante la imposición de restricciones ecológicas por parte de los organismos reguladores internacionales y también con la inversión de capital en alternativas a los métodos tradicionales que existen de obtener energía, encaminado a las industrias; incluida por supuesto a la marítima, hacia un futuro verde y de cero emisiones contaminantes.

Por ello durante los últimos años, las navieras y armadores han destinado grandes cantidades de su capital para el uso de combustibles menos contaminantes que marquen el camino para la industria en el futuro. No obstante, aun hoy en día existen dudas sobre cuál será la alternativa final que terminará adueñándose del mercado.

4.1. Gas Natural Licuado

El gas natural es un combustible fósil el cual proviene de la descomposición de materia orgánica subterránea durante millones de años y el cual en los últimos años de la navegación

ha adquirido un papel protagonista como candidato a ser el combustible propulsor de los buques en el futuro. No obstante, para que este pueda competir con los actuales combustibles, previamente debe someterse a un proceso de licuado mediante su enfriamiento a -161°C a presión atmosférica, del cual se obtiene el gas natural licuado (GNL); o LNG por sus siglas en inglés de Liquefied Natural Gas. Con esto también se logra reducir su volumen 600 veces, facilitando enormemente su transporte en buques especiales LNG donde viaja en grandes tanques criogénicos que mantienen su temperatura durante todo el trayecto que se necesite hacer. Al tratarse de un gas incoloro e inodoro se le suelen añadir aditivos para poder detectar fugas a través del olfato, en caso de que se produjera.

Se trata de un hidrocarburo, al igual que los combustibles de uso tradicional, pero con una serie de características técnicas que lo hacen mucho más limpio de cara a su uso como combustible marino.

- El **alto contenido en metano**, que es el principal componente del gas natural y que lo dota de gran potencia de propulsión;
- la **facilidad para ser mezclado con aire**, creando una carga homogénea que prende fácilmente, evitando así, las altas temperaturas que generan óxidos de nitrógeno. De hecho, se puede eliminar sobre el 90 % de las emisiones de NOx mediante el uso de gas natural en un motor de combustión interna correctamente adaptado;
- la **ausencia de azufre en su composición** hace que tras la combustión no se emitan óxidos de azufre (SOx), tan perseguidos por la legislación en las últimas décadas;
- las **menores emisiones de CO₂** tras la combustión y gracias a que el metano es su principal componente, el cual es una molécula de estructura simple que permite reducir en un 25% las emisiones de dióxido de carbono;
- y, por último, casi **no genera emisión de material particulado** debido también a la estructura sencilla de sus moléculas.

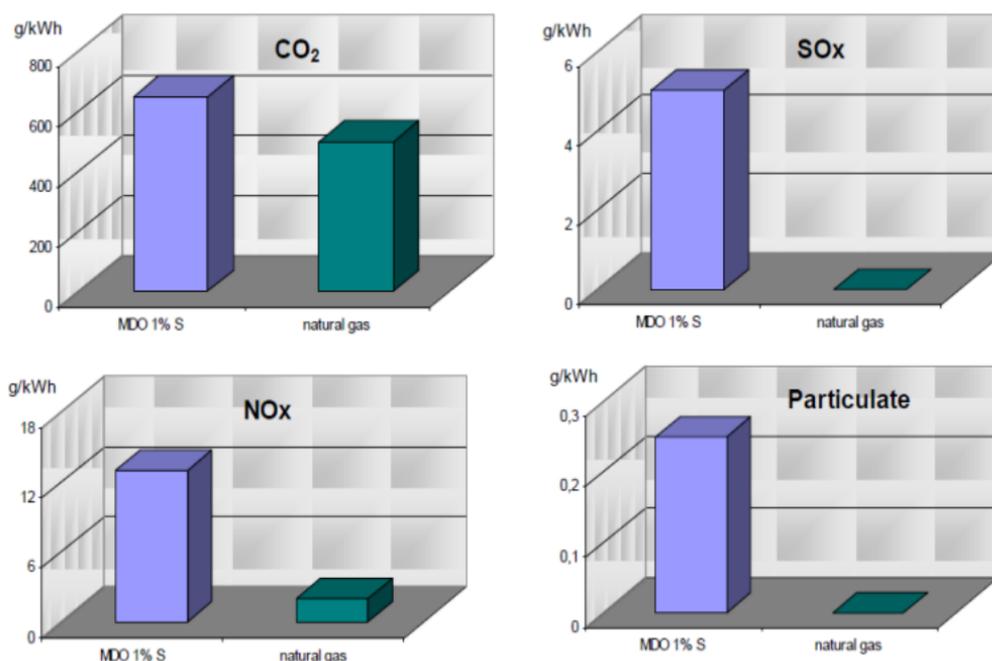
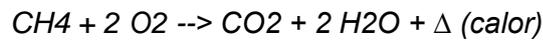


Ilustración 34: Comparación de la emisiones del gas natural y el Marine Diesel Oil

Véase representada en las anteriores gráficas de la ilustración 34, una comparación visual entre los productos resultantes de la combustión del MDO de 1% en contenido de azufre y los resultantes del gas natural. La reacción química de combustión que tiene lugar es:



Al ser usado como combustible, el GNL es casi dos veces más ligero que los combustibles residuales tradicionales y también es capaz de generar un 12% más de energía. Una tonelada es capaz de generar 15 MW/h mientras que la misma cantidad de petróleo produce 12 MW/h.

Sin embargo, también se ha de destacar que una tonelada de GNL ocupa aproximadamente el doble del volumen que ocupa una tonelada de combustible tradicional, por lo que requiere de un espacio de almacenaje a bordo mucho mayor. Esto hace que, para aquellas embarcaciones pequeñas, poder propulsarse usando gas natural signifique sacrificar una gran parte de la capacidad del buque además de tener que instalar tanques criogénicos, eclipsando el atractivo de las emisiones más limpias y que admite la legislación.

Además de ser más limpio, el gas natural licuado se asienta sobre un precio de mercado más estable; como norma general y dejando de lado eventos puntuales como la guerra de Ucrania, que el resto de los combustibles fósiles, haciendo que a medio-largo plazo la inversión hecha pueda verse compensada por la reducción de los costes operativos.

Debido a su mayor disponibilidad y al menor costo por unidad de energía, el GNL puede ser más competitivo que los combustibles tradicionales, aunque esto puede variar en función de la localización geográfica, la cantidad comprada, o la oferta y demanda del mismo. Según un (AIE), el precio promedio del LNG como combustible para el transporte marítimo en Europa en 2020 fue de alrededor de 16 dólares por millón de unidades térmicas británicas (MMBtu), mientras que en Asia el precio fue de alrededor de 8 dólares por MMBtu.

A continuación, una gráfica comparativo entre el HFO y LNG en buques de diferente potencia y estimando unas 8000 horas operativas al año:

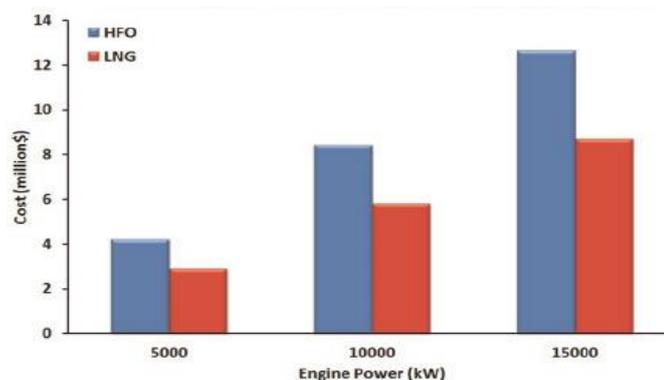


Ilustración 35: Comparación entre la eficiencia del HFO y LNG

El transporte del gas natural licuado se realiza en su mayoría por vía marítima a través de buques de GNL, equipados con avanzados sistemas de refrigeración y almacenamiento de gas natural. Estos consisten en cámaras criogénicas capaces de mantener la temperatura lo suficientemente baja como para almacenar el gas en estado líquido a presión ambiental.

Como medidas de seguridad cabe señalar la estructura de estos buques, que cuenta con un doble casco que proporciona una barrera adicional contra las fugas, rellenándose el espacio entre los cascos con líquido inerte para minimizar la posibilidad de ignición; los tanques de almacenamiento, están recubiertos por sistemas avanzados de aislamiento térmico y se dispone también de sistemas de ventilación y aireación que se encargan de evitar la acumulación de gases dentro de los tanques. Además, incluyen sistemas de prevención de fugas que garantizan la seguridad de la tripulación y del medio ambiente, ya que el mayor peligro que representa el transporte del gas natural en su estado líquido es el riesgo de producir una explosión BLEVE.

Las **explosiones BLEVE**; de sus siglas en inglés 'boiling liquid expanding vapour explosion', ocurren cuando en un tanque a presión o criogenizado se almacena un gas licuado el cual en condiciones ambientales sería un gas. Al producirse una fisura en el tanque contenedor de la sustancia, podría descender la presión o aumentar la temperatura; dependiendo del tipo de tanque, haciendo que todo el volumen de gas licuado en ebullición en su interior pase a estado gaseoso en un instante y, con motivo del aumento de volumen en un espacio confinado, genere una explosión violenta. En el caso particular del gas natural licuado, este viaja en los buques criogenizado por lo que sería sensible a un aumento de temperatura que rebase los -160°C , su punto de ebullición, y que multiplicaría su volumen por 600 rápidamente. Este elevado coeficiente de expansión sumado a las grandes cantidades que transportan los buques LNG hace que las medidas de seguridad y la preparación de la tripulación se tengan muy en cuenta a bordo.

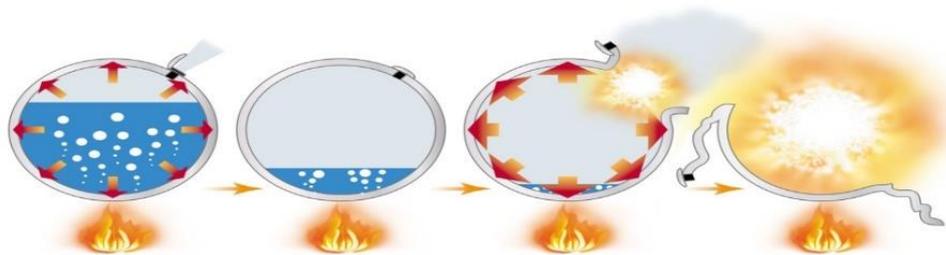


Ilustración 36: Secuencia de una explosión BLEVE

Por otra parte, cuando el transporte del gas natural se realiza por tierra, en su mayoría este viaja en su estado gaseoso a través de gaseoductos especialmente diseñados para su transporte, de manera segura a presiones de entre 30-70 atmósferas. Debido a que estos gaseoductos recorren cientos e incluso miles de kilómetros de distancia, resulta inviable la tarea de asegurar que en todos los puntos de esta tubería se mantienen las condiciones, ya sean de presión o temperatura, para mantener el estado líquido de este gas, por lo que en pro de la seguridad y para reducir el riesgo de explosiones BLEVE es transportado como gas.

Estos gaseoductos están fabricados con acero de alta resistencia y cruzan todo el planeta ya que este tipo de transporte del gas natural es el método más común y eficiente. A lo largo del recorrido de la tubería se encuentran las llamadas estaciones de compresión, donde se asegura que la presión del gas se mantenga constante y también lo impulsan a través de la tubería a altas velocidades resultantes de la alta presión.

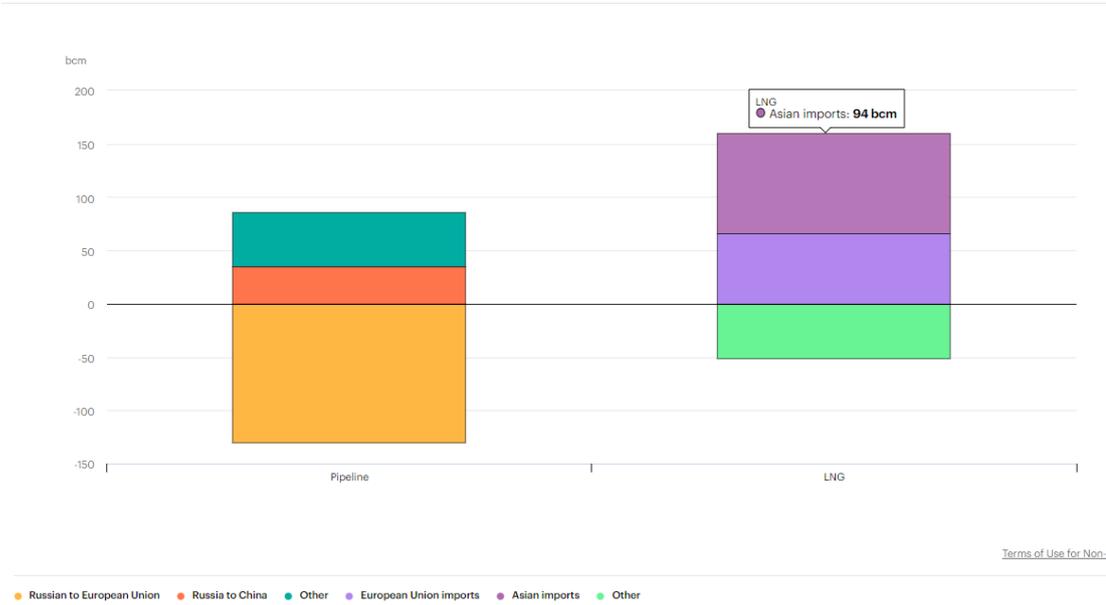


Ilustración 37: Comercio mundial de gas natural

En el anterior gráfico se muestra las cantidades transportadas por gaseoducto y en buques desde 2018 hasta 2023, comparando con los datos de años anteriores. Datos obtenidos de la Agencia Internacional de Energía.

Otro método que tiene el gas natural de moverse por tierra es por medio de camiones y trenes cisterna, que lo almacenan en su estado líquido, criogenizado a -162°C, aunque las cantidades que se transportan con este método son ínfimas en comparación. Los recorridos suelen ir desde las plantas de licuefacción o terminales de GNL hasta el destino final, que comúnmente suelen ser áreas remotas sin acceso al sistema de gaseoductos. Estos camiones cisterna y trenes están especialmente diseñados para el transporte del gas como

líquido y por lo tanto cuentan con avanzados sistemas de aislamiento térmico y ventilación de los tanques.

4.2. Electrificación

A lo largo de la historia industrial, los motores de combustión interna han sido mucho más investigados y desarrollados que los motores eléctricos, a pesar de que ambos tipos tengan una antigüedad similar. De hecho, los primeros motores eléctricos dedicados a la propulsión de vehículos, terrestres en este caso, data de finales del siglo XIX al igual que el primer automóvil impulsado con motor de combustión interna.

Además, este hecho resalta ante las **ventajas operativas que los motores eléctricos** presentan respecto a los motores de combustión como, por ejemplo, la entrega instantánea del par motor, ya que si se quiere diseñar un motor de combustión que opere bien a bajas revoluciones, este mismo perderá parte de su eficiencia cuando el régimen de revoluciones sea mayor, y viceversa. En el caso de los motores eléctricos la entrega de la potencia total se produce de manera instantánea desde el mínimo régimen ya que no es necesario alcanzar un cierto régimen de revoluciones que aproveche la eficiencia del motor. Cabe destacar también que las eficiencias conseguidas por ambos tipos de motores distan mucho la una de la otra, ya que mientras que los eléctricos logran acercarse a eficiencias del 90%, los de combustión interna más avanzados se quedan en el 30 o 40%, diferenciando entre los de gasolina y diésel respectivamente.

Otra ventaja técnica bastante significativa de los motores eléctricos frente a los tradicionales de combustión, es el hecho de que el movimiento producido en los primeros es de rotación ya que están contruidos básicamente de dos partes, una fija, el estátor, y otra móvil, el rotor. Al introducir una corriente eléctrica en los bobinados se genera un flujo magnético que, obedeciendo a la ley de Ampere hace girar al rotor el cual podría perfectamente transferir el movimiento rotativo a una hélice que propulse un buque mercante. Sin embargo, en un motor de combustión interna, el movimiento resultante obtenido del recorrido de los pistones a través de los cilindros es lineal, por lo que es necesario que por medio del cigüeñal se convierta en una fuerza rotativa, perdiendo en el camino una ligera parte de la energía obtenida.

A continuación, se muestra un gráfico en el que se compara la entrega del par motor en ambos tipos de motores. Se aprecia como desde el primer momento en el que se solicita

la potencia en el motor eléctrico, este la entrega completamente mientras que, en el caso de la combustión interna, además de ser la potencia más limitada, se necesita alcanzar mayores revoluciones para poder entregarla.

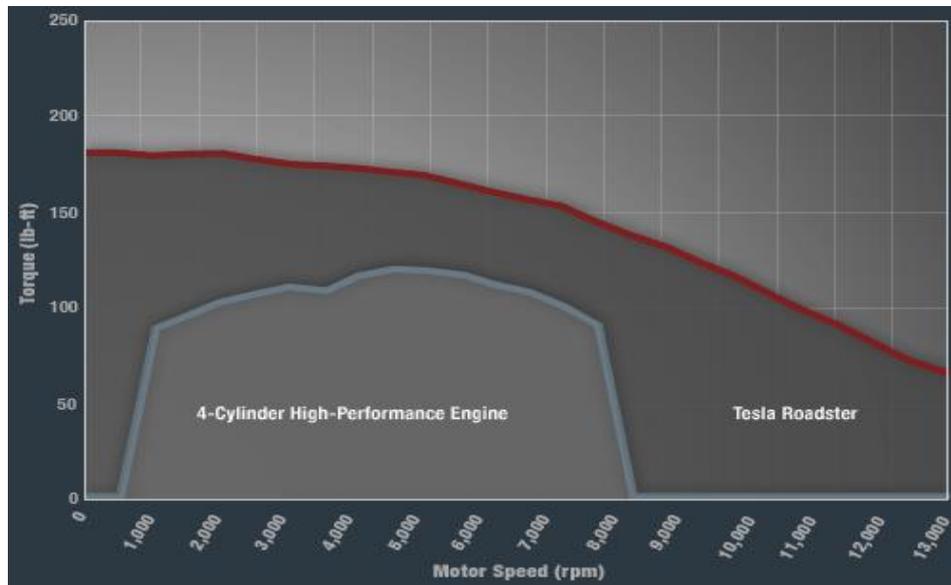


Ilustración 38: Comparación entre motor eléctrico y motor de combustión interna

En la actualidad, esta rivalidad entre ambos tipos de motores está muy latente en la industria automovilística ya que, con motivos de las prohibiciones hacia los coches de combustión que ha establecido la Agenda 2030 por parte de la Unión Europea, los fabricantes se han lanzado a investigar la vía eléctrica y la problemática ambiental que viene preocupando a la humanidad durante las últimas décadas ha generado un interés creciente por parte de armadores y navieras por desarrollar la tecnología de las motorizaciones eléctricas para reducir las emisiones contaminantes.

Los motores eléctricos marinos deben cumplir con una serie de exigencias para que su uso a bordo pueda ser viable:

- En primer lugar, deben ser capaces de entregar la **potencia necesaria** para impulsar al buque y su carga a través del agua y que en el caso de los portacontenedores las cifras requeridas van de los 20.000 a los 80.000 caballos de fuerza (HP, *horse power*) en promedio; por lo que, a mayor tamaño, mayor será la potencia demandada para mover el buque.
- También se deben conseguir **niveles de eficiencia altos** para poder realizar largos trayectos sin quedar sin combustible o energía eléctrica. En el caso de aquellos buques que operan utilizando combustibles fósiles convencionales, las eficiencias son de aproximadamente el 35%, cifra muy fácil de superar para un motor eléctrico.
- La **fiabilidad** es otro de los puntos clave determinantes para los motores marinos ya que estos son motores que pasarán la mayor parte de su vida útil en funcionamiento por lo que es necesario que sean capaces de operar durante largos períodos de tiempo sin fallas ni variaciones en la entrega de potencia.

- En la mayoría de buques, los espacios donde se sitúan los motores son estrechos y confinados, así que se debe asegurar que el **mantenimiento sencillo** de estos se pueda realizar, haciendo accesibles todas aquellas partes que pudieran necesitar ser reparadas sin necesidad de tener que interrumpir la actividad del buque para ello, incluso si este se encontrase en alta mar.
- Y, por último, los motores marinos también deben **obedecer normativas** establecidas por organismos internacionales sobre ruido y vibraciones además de asegurar las normas de seguridad contra incendios y explosiones.

4.2.1. Obtención de la energía

El uso de motores eléctricos supondría un avance hacia la descarbonización de la industria marítima, pero con ciertos matices. El primero de ellos está dirigido a la obtención de esta energía que almacenarían las baterías de los buques, y es que hoy en día no es posible generar únicamente por medio de energías renovables.

Los datos de la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA) revelan que, en el año 2022, el 83% de todas las instalaciones de generación de energía eléctrica fueron para energías renovables. Esto sitúa en la actualidad en 3.372 gigavatios (GW) la capacidad mundial de generación a través de energías renovables, pero esta cifra en contraste con la cantidad de energía que gasta España anualmente; concretamente 250.421 GW en 2022, sigue sin ser un valor significativo. No obstante, lo más positivo del informe arrojado por la IRENA es que los países están destinando importantes esfuerzos a crear una infraestructura de generación de energía renovable que, en un futuro, sea capaz de abastecer las necesidades globales y finalmente poder prescindir de los combustibles fósiles.

El panorama actual de generación de energía renovable, diferenciando entre los distintos tipos de fuentes empleadas, está dominado por la energía de origen hidroeléctrica, que genera el 40% del total y que ha experimentado un aumento de 21 GW de capacidad, lo que es un 2% más que últimos años. Seguidamente se sitúa la energía solar fotovoltaica; capaz de producir el 28% de la energía renovable mundial y que ha sido claramente la fuente que mayor aumento de capacidad ha logrado, con un aumento de 191 GW en su capacidad total. También la energía eólica aumenta su capacidad de producción en un 9% del total, que suponen 75 GW adicionales para la red renovable y que la sitúan en la tercera fuente con un 27% de la producción total. De la energía eólica cabe destacar la gran inversión hecha en plantas de producción eólica marinas, muchas de ellas en el Mar del Norte, y que hoy por hoy son el método más eficiente de generar energía renovable. El 5% restante de producción

renovable se atribuye a métodos como el uso de biocombustibles, la energía geotérmica o la mareomotriz, que no resultan tan eficientes como los otros métodos y que en un futuro se verán reemplazados por estos.

Véase a continuación un diagrama que refleja las distintas fuentes de producción eléctrica renovable:

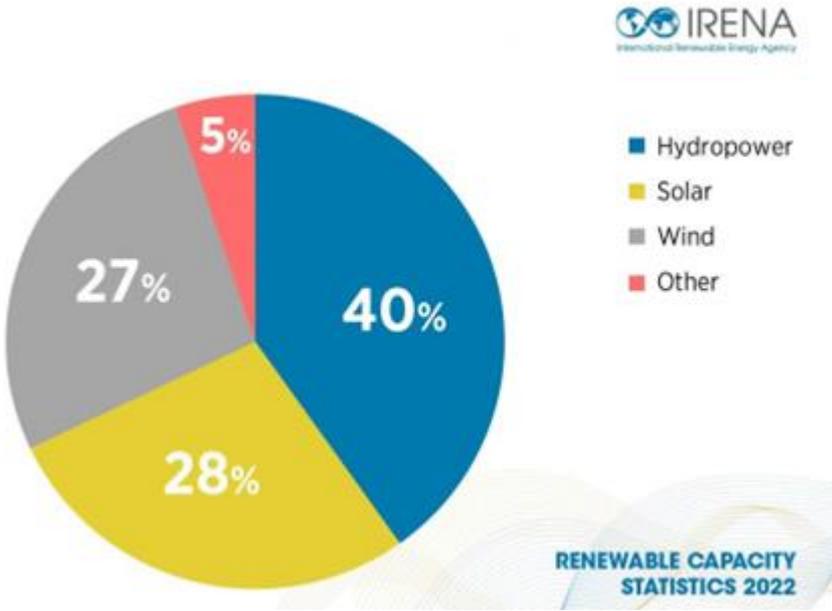


Ilustración 39: Producción de energía renovable

Sumado a este crecimiento, se encuentra la tendencia a la baja de las fuentes no renovables, con motivo de los compromisos internacionales y regulaciones ambientales, como por ejemplo el Acuerdo de París, que han establecido objetivos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover el uso e investigación de las energías limpias. El mercado de los combustibles tradicionales, se ve condicionado por avances tecnológicos que han permitido abaratar los costos de las instalaciones de energías renovables y mejorar la infraestructura para el almacenamiento de la energía en baterías. Es gracias a estos avances que las estadísticas actuales anuncian un futuro próspero para las energías renovables.

No obstante, las fuentes de energías no renovables producen la mayoría de la energía requerida hoy en día, por lo que los efectos contaminantes se siguen produciendo a pesar del avance en materias de infraestructura de energías renovables. Esto, se ilustra la ilustración 41 donde se distingue entre las distintas fuentes:

Fuente: MITECO

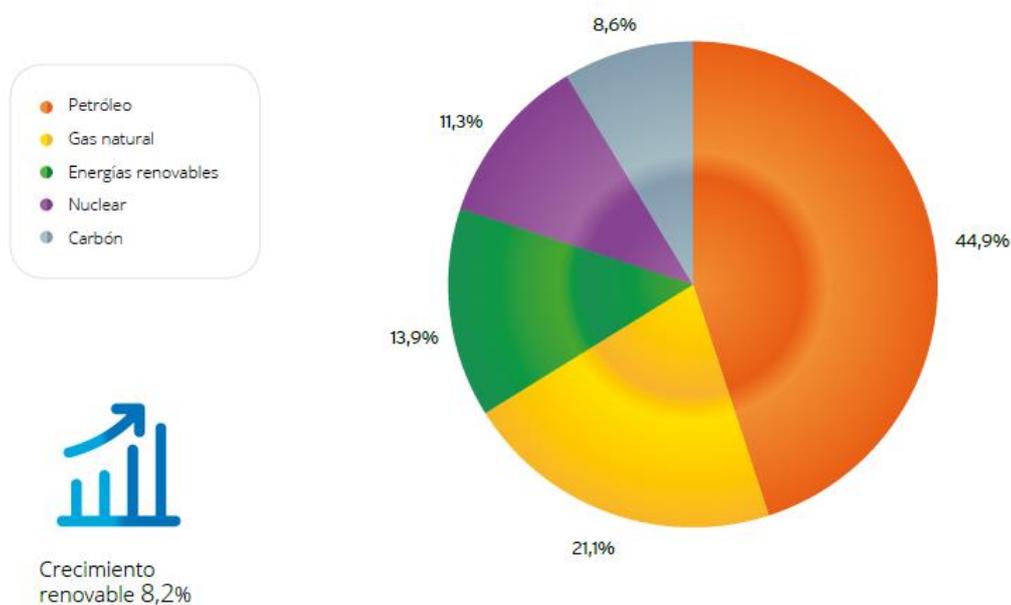


Ilustración 40: Consumo de energía primaria en España

A pesar de las regulaciones cada vez más estrictas hacia los combustibles contaminantes, la realidad es que hoy en día las principales fuentes de energía son el petróleo y el gas natural, los cuales emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera en su combustión y que abarcan dos tercios del total de la producción en España.

Precisamente por el origen de la mayoría de la energía eléctrica de la que se dispone en la actualidad, es que un futuro basado en motores eléctricos para la industria marítima no supondría la descarbonización de esta. Aunque con la continuación de las políticas acordadas y con más investigación e inversión, en el futuro es posible que la energía pueda obtenerse de manera neutral para el medio ambiente, es decir con cero emisiones.

4.2.2. Motores LNG

En los últimos años, ha aumentado significativamente el número de buques que basan su propulsión en el gas natural y que utilizan motores que pueden quemar gas natural licuado el lugar de combustibles líquidos convencionales, como diésel o fuelóleo, para generar la energía necesaria que impulsa los barcos. Son muchos los tipos de buques que han implementado este sistema de propulsión desde buques contenedores, buques cisterna,

buques de carga general e incluso buques de pasajeros incluyendo barcos de crucero, ferries, etc.

El atractivo del gas natural para las navieras viene condicionado por las nuevas normativas anticontaminación que penalizan el uso de combustibles fósiles pesados en cuya combustión se liberan óxidos de nitrógeno y azufre, además de por el encarecimiento del resto de combustibles fósiles con respecto del GNL cuyo precio de mercado es más estable y menor.

Las diferencias de un motor de combustión de gas natural frente a un motor marino convencional están relacionadas a los sistemas de inyección, ya que en los primeros se inyecta gas en lugar de un combustible líquido y también con las formas de la cámara de combustión que deben estar preparadas para albergar una explosión producida por la ignición del gas natural mezclado con aire.

Además recientemente se han popularizado los motores de combustión llamados 'dual fuel' que son motores marinos capaces de funcionar tanto con combustibles líquidos convencionales como con gas natural e incluso una combinación de ambos, lo cual dota a los buques que los equipen de versatilidad sobre qué tipo de combustible utilizar dependiendo de la disponibilidad de cada uno de ellos, las exigencias ambientales y los precios de mercado del momento.

Cuando operan utilizando gas, este es inyectado a baja presión; en torno a 5 bar, inyectando una pequeña cantidad de diésel a la cámara de combustión que produzca el encendido de la mezcla de aire/gas. También es posible cambiar el combustible empleado por el motor sin necesidad de interrumpir la operación.

Véase a continuación la ilustración 38, representativa del ciclo de los motores dual-fuel:

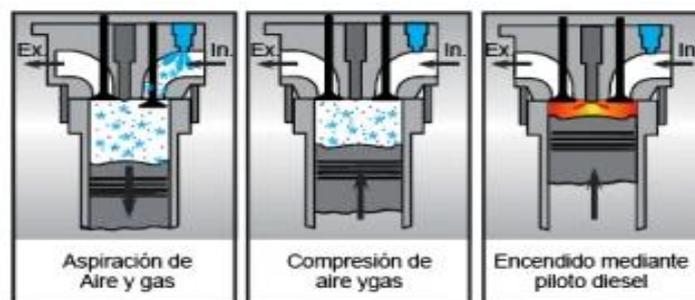


Ilustración 41: Funcionamiento motor dual-fuel

En general, los motores dual fuel marinos son una solución prometedora para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes en la industria marítima, ya que ofrecen una mayor eficiencia y flexibilidad en la operación del barco.

4.2.3. Buques eléctricos actuales

Supone un reto conseguir desarrollar motores eléctricos que cumplan con los requisitos clave de los motores marítimos pero varias empresas ya lo han conseguido y lo han implementado en sus buques. Un ejemplo de ello son los buques **Yara Birkeland** y el **Medstraum**, ambos noruegos.

Yara y la empresa tecnológica KONGSBERG se han asociado para construir el primer portacontenedores autónomo y sin emisiones del mundo: **Yara Birkeland**. El buque de emisiones cero transportará fertilizantes minerales desde la planta de producción de Yara en Porsgrunn (Noruega) hasta el puerto regional de exportación de Brevik y se espera que logre sustituir los viajes de 40.000 camiones diésel anualmente, evitando que grandes cantidades de CO₂, NO_x y SO_x se liberen a la atmósfera. El Yara Birkeland tiene capacidad para 120 TEUS, 80 metros de eslora y entró en funcionamiento comercial en Porsgrunn en la primavera de 2022.

Es impulsado por dos hélices eléctricas Azipull de 900kW cada una y que son movidas por las baterías del buque que cuentan con una capacidad de 7MWh. Es capaz de alcanzar una moderada velocidad máxima de 13 nudos, lo cual dista del resto de buques de su clase ya que suelen poder alcanzar entre los 16 a 25 nudos de velocidad máxima.

En el aspecto técnico, KONGSBERG es responsable del desarrollo y suministro de todas las tecnologías esenciales del Yara Birkeland, como son los sensores y sistemas necesarios para las operaciones autónomas y remotas además de las baterías y sistemas de control.



Ilustración 42: Buque Yara Birkeland

Por otra parte, el **buque de pasaje Medstrum** surge del proyecto TrAM (Transport: Advanced and Modular), el cual está financiado y promovido por el clúster noruego Maritime CleanTech, la administración provincial de Rogaland y fondos europeos del programa Horizon 2020. El objetivo del proyecto es desarrollar un sistema de producción de buques basado en

módulos que permita abaratar los costes de fabricación en un 25% y los costes de ingeniería en un 70% y así poder desarrollar una flota de buques sin huella medioambiental que pueda ser competitiva con la fabricación naval tradicional, ayudando a alcanzar la descarbonización de la industria antes.

El Medstraum, que tiene una eslora de 30 metros y manga de 9 metros, puede alcanzar los 23 nudos de velocidad únicamente empleando energía eléctrica para cubrir la ruta de 40 minutos entre Stavanger, Byøyene y Hommersåk transportando consigo a 147 pasajeros. Se impulsa a través de dos motores de 550kW cada uno y que son alimentados por un banco de baterías con capacidad de 1530 kWh obra de la empresa tecnológica noruega Corvus Dolphin.

Este buque evita la liberación de 1.500 toneladas de dióxido de carbono anualmente si se compara con un ferry de propulsión diésel de iguales características. Además, según ha afirmado la administración de Rogaland, permite acercarse al modelo de transporte ecológico que las ciudades modernas necesitan y ha generado el interés por implementarse en los canales de las ciudades belgas o el Támesis en Londres, para poder sustituir a 60 guaguas que contribuyen al colapso del tráfico en la ciudad.



Ilustración 43: Buque Medstraum

Debido a motivos técnicos, no se ha desarrollado a gran escala la tecnología eléctrica para la propulsión de buques, ya que existen varios factores que limitan en gran medida la competitividad de este sistema de propulsión ante otros, ya sean tecnologías en desarrollo o el uso de combustibles fósiles. Y es que existen algunos problemas comunes asociados a las baterías de buques eléctricos.

En primer lugar, la capacidad de almacenamiento de las baterías hace que la autonomía de los buques se vea limitada, aunque si bien se ha avanzado mucho en materia de densidad de energía de las baterías aún son necesarios avances para igualar el rendimiento de otros sistemas de propulsión. El tiempo de recarga también supone otro obstáculo logístico puesto que recargar completamente las baterías puede llevar horas o incluso días, por lo que la eficiencia operativa de estos buques se ve afectada especialmente en rutas con horarios ajustados o donde la infraestructura de carga es limitada. Otro factor

importante a tener en cuenta es el costo y la disponibilidad de las baterías aptas para usos a bordo que, por ser la producción tan limitada, tienen un alto costo. Como último aspecto, mencionar la vida útil y la degradación de las baterías, ya que el reciclaje de estas una vez han cumplido su vida útil es altamente complejo y contaminante.

No obstante, teniendo en cuenta todos estos factores los buques de propulsión eléctrica pueden resultar útiles para determinadas tareas. Estas pueden ser el transporte de pasajeros en ciudades divididas por ríos, el transporte de mercancías entre puertos cercanos, las embarcaciones dedicadas a operaciones portuarias; como remolcadores o falúas de prácticos, y todos aquellos buques cuya navegación tenga poco recorrido.

4.3. Hidrógeno

El hidrógeno (H₂) es considerado como una fuente de energía altamente atractiva para el futuro debido a su capacidad de combustión no contaminante. Al combinarse con el oxígeno del aire, el hidrógeno libera la energía química almacenada en su enlace H-H, generando únicamente vapor de agua como subproducto de la combustión. Se destaca como uno de los elementos más prevalentes en la naturaleza y se encuentra en la posición principal de la tabla periódica, ocupando el primer puesto. Se encuentra en forma de gas y está presente en aproximadamente el 75% de la materia en el universo. El hidrógeno es limpio, seguro, insípido, incoloro e inodoro.

Aunque el agua es la fuente más común de hidrógeno en nuestro planeta, también se encuentra en la mayoría de los compuestos orgánicos y se puede extraer de diversas sustancias, incluyendo las aguas residuales. A diferencia de los combustibles fósiles, que son finitos, el hidrógeno es una fuente de energía inagotable.

Sin embargo, el hidrógeno no es una fuente de energía primaria como lo es el petróleo, sino que debe producirse para convertirse en combustible. Para generar electricidad a partir del hidrógeno, se requiere una pila de combustible de hidrógeno. En esta pila, el hidrógeno almacenado se combina con el oxígeno del aire para producir agua y una cantidad significativa de electricidad.

Además, el hidrógeno tiene la capacidad de almacenar energía eléctrica. Cuando se produce un exceso de electricidad en comparación con la demanda, este excedente puede utilizarse para producir hidrógeno y almacenarlo. Luego, este hidrógeno almacenado puede convertirse nuevamente en electricidad mediante el uso de una pila de combustible.

4.3.1. Tipos de hidrógeno

Como se ha mencionado, el hidrógeno no se encuentra de forma aislada en la naturaleza por lo que para obtenerlo es necesario separarlo de los otros elementos que lo acompañan, como por ejemplo el oxígeno en el caso de ser agua (H₂O) la materia prima empleada. Por ello, en la actualidad el hidrógeno se clasifica en distintos tipos en función del método empleado para su producción y son los siguientes:

- **Hidrógeno gris:** se obtiene a partir de combustibles fósiles, siendo el más común el gas natural y liberando dióxido de carbono residual a la atmósfera. Es el que más se consume en la actualidad debido a su menor costo de obtención.
- **Hidrógeno azul:** el método de obtención es similar al del hidrógeno gris ya que también emplea combustibles fósiles, pero en este caso el dióxido de carbono resultante es capturado y almacenado para minimizar el impacto ambiental.
- **Hidrógeno negro/marrón:** se trata de aquel que se obtiene al calentar hulla o lignito, dos tipos de carbón mineral, por lo que es el más contaminante de todos los procesos, liberando grandes cantidades de dióxido de carbono a la atmósfera en relación a la cantidad de hidrógeno obtenida.
- **Hidrógeno verde:** es el menos contaminante de ellos, ya que la materia prima utilizada es agua la cual es separada en hidrógeno y oxígeno mediante electrólisis. Además, la energía eléctrica requerida para el proceso de electrólisis proviene de fuentes renovables. Actualmente la producción de este tipo supone menos de un 5% del total.

Los cuatro tipos mencionados hasta ahora corresponden a los tipos más comunes de hidrógeno que se producen en la actualidad, pero cabe mencionar que en los últimos años se han explorado múltiples procesos para la producción del hidrógeno.

- **Hidrógeno amarillo:** también se obtiene a raíz de la electrólisis del agua, pero en este caso la energía eléctrica empleada tiene origen en fuentes no renovables. Por ello, los problemas de las emisiones de la propia red eléctrica se perpetúan en su producción.
- **Hidrógeno turquesa:** se genera mediante la pirólisis del metano, que consiste en calentarlo por encima de su temperatura de descomposición en ausencia de oxígeno, por lo que no llega a producirse la combustión. Genera en el proceso carbón sólido como subproducto.
- **Hidrógeno rosa:** es aquel en el que la energía que genera la electrólisis del agua es energía nuclear. El uso de este tipo de energía produce residuos radioactivos cuyo tratamiento es altamente complejo.

Todos estos métodos de producción acarrearán distintos costos por lo que la inversión en investigación y desarrollo para abaratarlos es vital para lograr la conversión hacia el hidrógeno como combustible. A continuación, un gráfico con los costos de producción de los tipos de hidrógeno:

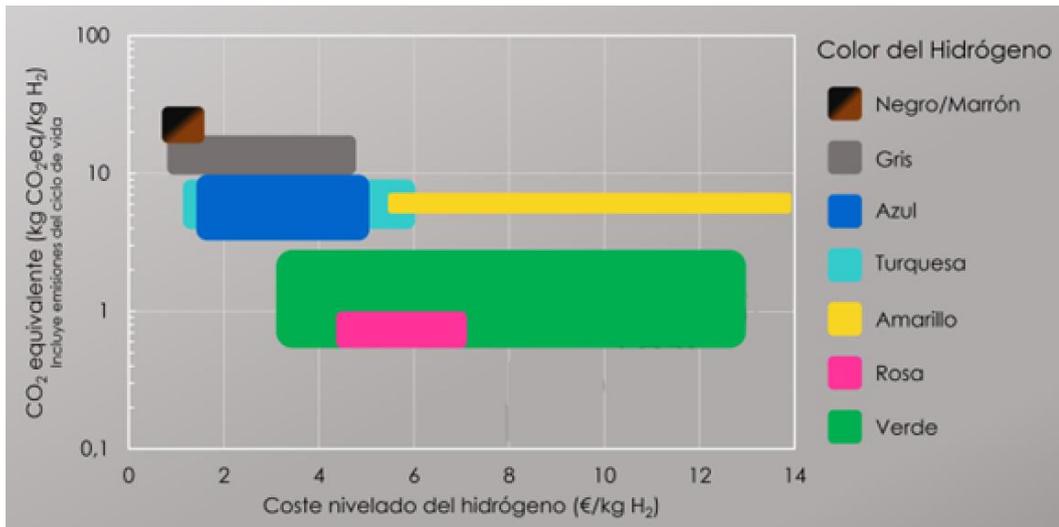


Ilustración 44: Costos de producción de los tipos de hidrógeno

4.3.2. Métodos de producción del hidrógeno

Existen múltiples procesos para la producción de hidrógeno, tanto formas de hacerlo liberando emisiones de GEI como formas de hacerlo sin generar estos gases y siendo completamente neutrales para la naturaleza. Cabe recordar que el fin de la investigación del hidrógeno como combustible tiene por objetivo la descarbonización de las industrias y alcanzar el punto de cero emisiones, por lo que las formas de producción más atractivas son aquellas que no generan gases contaminantes para la atmósfera, es decir la producción de hidrógeno verde.

No obstante, hoy en día en hidrógeno renovable es el que mayor costo supone generar y por ello es el menos producido a pesar de sus ventajas ambientales. La figura mostrada a continuación especifica la producción de hidrógeno que abarca cada método:

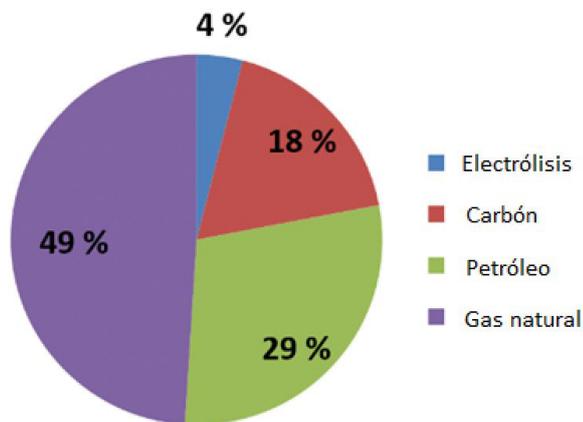


Ilustración 45: Métodos para la producción de hidrógeno

A pesar de esto los organismos internacionales están destinando grandes esfuerzos a abaratar la producción de hidrógeno por medios renovables y para ello, en la actualidad el método más extendido es *la electrólisis del agua* mediante el uso de energía eléctrica de origen renovable. En este proceso la energía eléctrica se consigue convertir en energía química almacenada en electrones en enlaces químicos estables por medio de un electrolizador que cuenta con un cátodo y un ánodo separados entre sí por un electrolito acuoso. En el ánodo se produce la oxidación del agua en iones de hidrógeno y gas oxígeno mientras que en el cátodo el agua es reducida a hidrógeno en estado gaseoso y iones de hidróxido.

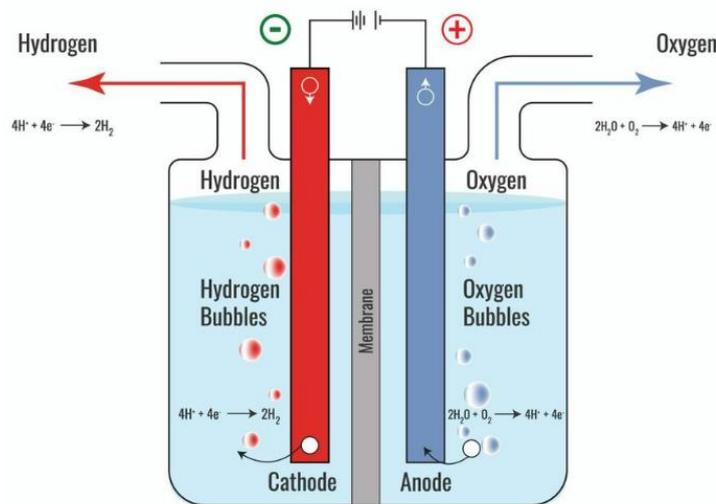


Ilustración 46: *Electrólisis del agua*

También se ha profundizado en los últimos años en un proceso llamado *fotoelectrocatalísis*, el cual permite convertir directamente energía solar en hidrógeno por medio del uso de un módulo electrocatalítico. Este último está construido por celdas fotoelectrocatalíticas, donde se lleva a cabo la ruptura de la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno renovables por medio de un fotocátodo, donde se produce la conversión directa de los fotones en hidrógeno, y un ánodo que produce el oxígeno. Entre ambos electrodos se encuentra un separador que se encarga de evitar que los gases se mezclen.

A continuación, una representación del funcionamiento de una **celda fotoelectrocatalítica**:

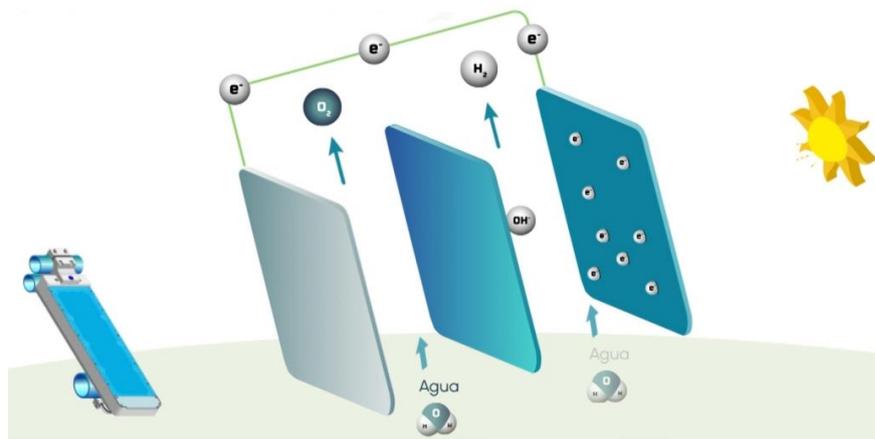


Ilustración 47: Interior de una celda fotoelectrocatalítica

Otros métodos extendidos para la producción de hidrógeno verde, aunque mucho menos eficientes, es mediante procesos biológicos. El primero de ellos consiste en aprovechar los residuos agrícolas, forestales o de procesos industriales, la llamada biomasa, para someterlos a procesos termoquímicos en los que se provoca la combustión incompleta de estos residuos hasta alcanzar los 700°C, punto en el que la biomasa se gasifica. Para lograr esta elevada temperatura sin que se oxiden todos los componentes, es necesario aportar al proceso una cantidad de oxígeno muy inferior a la necesaria para que se produzca la combustión completa. Tras este proceso la biomasa se convierte en un gas rico en hidrógeno que será posteriormente purificado para obtener como resultado final, un gas mucho más puro y apto para su uso como combustible ecológico.

En el caso de España, según datos de Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, se estima que existe la capacidad de producir 224 MW de energía eléctrica procedentes del biogás generado con este método. Sin embargo, la producción de hidrógeno verde sería inviable a gran escala por medio de este método, simplemente por la complejidad del proceso frente a la electrólisis del agua como ejemplo. Este sistema podría llegar a convertirse en una forma de autoabastecimiento para la industria agrícola, mediante el aprovechamiento de los residuos que generan e incluso acabar por completo con la huella ambiental que genera.

También existe un método de producción de hidrógeno basado en procesos biológicos el cual sigue en desarrollo en la actualidad y que consiste en aprovechar la *capacidad de las algas de generar hidrógeno* cuando estas se encuentran en un entorno controlado donde son privadas de azufre. Bajo estas condiciones, pasan de producir oxígeno, tal y como ocurriría con una fotosíntesis estándar, a generar hidrógeno en su lugar. Los estudios apuntan a que este sistema comenzaría a ser económicamente viable mientras se consiga superar la barrera del 7-10% de conversión de luz solar a hidrógeno.

Véase en la siguiente imagen un prototipo del año 2021 de una planta de producción de hidrógeno verde mediante el uso de algas:

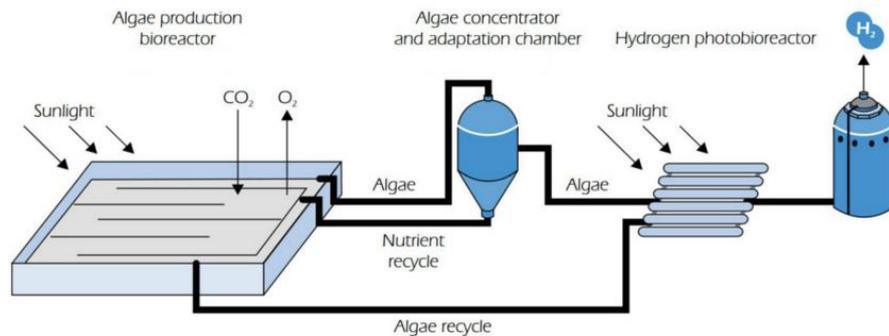


Ilustración 48: Concepto de 2021 de planta de producción de hidrógeno con algas

4.3.3. Acciones en curso

El hidrógeno como alternativa a los combustibles fósiles empleados en la actualidad ha despertado el interés de las industrias que buscan descarbonizarse, por ello son diversas las medidas que se están implementando para promover este tipo de combustible.

Las primeras reacciones han sido de los gobiernos, los cuales han introducido políticas y regulaciones que fomentan la expansión del hidrógeno como fuente de energía limpia, los cuales incluyen tanto nuevas normativas que empujan a las industrias hacia fuentes de energía limpias como incentivos fiscales, subsidios y programas de financiación para la investigación y el desarrollo de esta tecnología. Sin ir más lejos, el gobierno de España ya ha cerrado varios acuerdos en relación a aumentar la infraestructura de hidrógeno verde.

El primero de estos, tuvo lugar el pasado noviembre de 2022, firmándose un protocolo de colaboración con la **naviera Maersk** en el que el gigante del transporte marítimo ha declarado sus intenciones de impulsar la producción de hidrógeno verde y biocombustible en España, por medio de un proyecto que contará con una **inversión de 10.000 millones de euros**, además de fondos europeos existentes para esta causa.

Debido a la posición estratégica de España y al fácil acceso a las energías renovables, Maersk ha desarrollado un proyecto en el que se abarca toda la cadena de valor, que va desde la producción de la energía renovable hasta los sistemas de suministro en puerto, apoyándose en las universidades y empresas locales. También se instalarán plantas eólicas y solares con capacidad para generar 4.000 megavatios (MW) promovidos por la propia compañía.

El desarrollo de este proyecto posicionaría al país como uno de los grandes centros a nivel mundial en cuanto a capacidad de producción de hidrógeno verde para afrontar la descarbonización de la industria marítima.

Otro acuerdo importante en el que participa el gobierno español es el **proyecto H2 MED**, que consiste en la construcción de un entramado de tuberías, que conectarán la Península Ibérica y Francia, para el transporte de hidrógeno como combustible. Se trata de un principio de acuerdo en el que han participado los representantes de los gobiernos de **Portugal, España y Francia** además de la presidenta de la Comisión Europea. El proyecto costará alrededor de 2.500 millones de euros y contará con la financiación de la Unión Europea al 50%.

Se trata de la primera infraestructura a gran escala destinada al transporte de hidrógeno en el mundo y que será capaz de transportar el 10% del hidrógeno verde que necesita la Unión Europea según cálculos internos y se prevé que en el año 2030 esté en pleno funcionamiento.

Véase a continuación en el mapa de la ilustración 49 el recorrido de los gaseoductos **H2 MED**:



Ilustración 49: Trazado de los gaseoductos del proyecto H2 MED



Ilustración 51: Futura planta de producción de hidrógeno verde del puerto de Santa Cruz de Tenerife

4.3.4. Motor de combustión de hidrógeno

En la actualidad los sistemas de propulsión más extendidos y sobre los que más se conoce son los motores de combustión interna. Por este motivo, poder diseñar un motor de combustión que funcione con hidrógeno significaría un avance hacia la descarbonización hasta que se consiga abaratar la fabricación de otras técnicas, como la pila de hidrógeno, la cual resulta más prometedora en cuanto a emisiones. Serviría como puente entre la tecnología de la que se dispone actualmente y el hidrógeno como combustible para el futuro, además de dejar de emitir muchas de las emisiones que generan los combustibles actuales.

El funcionamiento de estos motores ya se ha probado por varias marcas de automóviles, como por ejemplo BMW, que en el año 2006 presentó su ***Serie 7 que es capaz de funcionar indistintamente con gasolina e hidrógeno***, siendo el primer coche de producción en serie en hacerlo. Cuenta con un motor de 6.0 litros con 12 cilindros en V que desarrolla una potencia de 260 CV y cuyas emisiones contaminantes cuando opera con hidrógeno son prácticamente nulas, a excepción de una pequeña porción de óxidos nitrosos y material particulado proveniente de los lubricantes del motor al entrar en contacto con las altas temperaturas de la combustión.

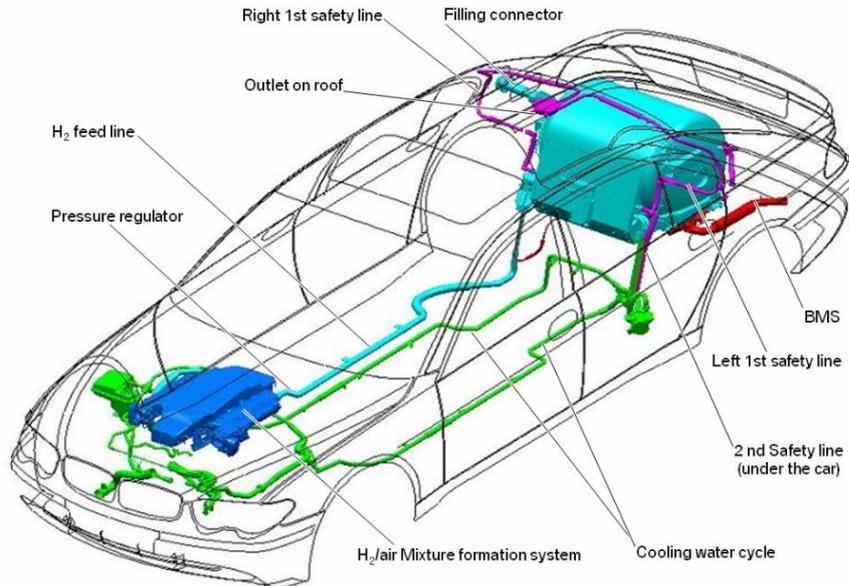


Ilustración 52: *Sistemas de almacenamiento y propulsión del BMW Hydrogen Serie 7*

El sistema de funcionamiento es el mismo que el de un motor convencional de cuatro tiempos en el que se usa gasolina, con el detalle de que son necesarios ajustes en el sistema de inyectores ya que la cantidad necesaria de hidrógeno para hacerlo funcionar es mucho menor la de gasolina, debido a su mayor poder detonante. Esto se debe a que la cantidad de octanos del hidrógeno es de 130, mientras que el de la gasolina de uso común es de entre 87 y 98 octanos dependiendo del país. Por ello, también es necesario reducir la potencia máxima capaz de desarrollar un motor común si se quisiera hacerlo funcionar con hidrógeno.

Es una solución con un gran parecido a los motores de combustión interna de gas natural, ya que a fin de reducir las emisiones que dejan los combustibles fósiles convencionales, se acude a un carburante más limpio y ecológico sin tener que realizar grandes cambios a nivel estructural. Ahí reside el gran atractivo industrial, ya que, inicialmente no supone una gran inversión, pero consigue atajar el problema de las emisiones. Para la industria marítima sería una solución factible si la cadena de producción y distribución de hidrógeno se extendiese a nivel mundial y tuviera precios competitivos, por ello la necesidad de seguir investigando.

Sin embargo, la mayor ventaja que presenta el motor de combustión interna de hidrógeno, a pesar de no tener una red de producción y distribución firmemente establecida, frente al de gas natural es la menor cantidad de emisiones resultantes de la combustión, ya que el gas natural emite una importante cantidad de dióxido de carbono el cual contribuye al calentamiento global, por lo que no es válido como combustible para un futuro con cero emisiones.

En el siguiente gráfico se compara las emisiones de CO₂ entre combustibles convencionales, HFO y MGO, el GNL y el hidrógeno, diferenciando en este último el sistema de producción empleado:

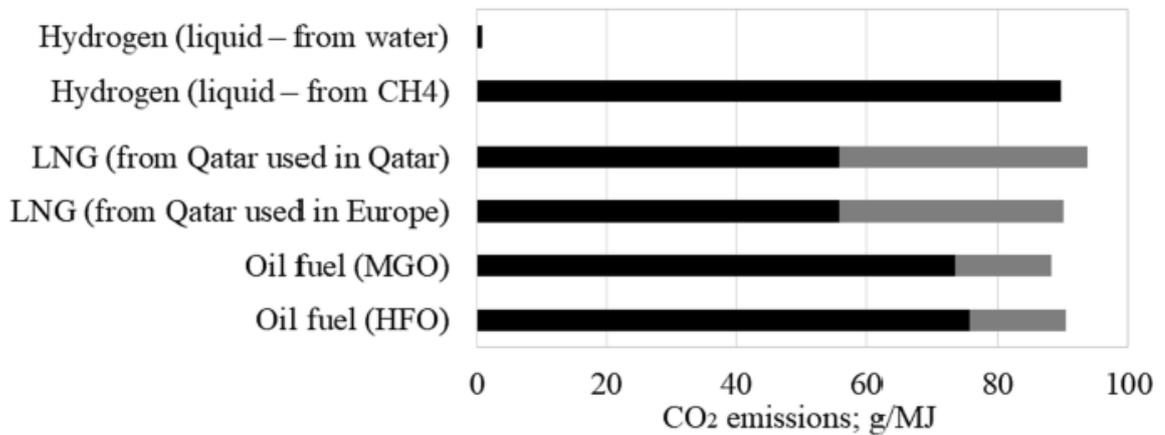


Ilustración 53: Comparación de emisiones entre hidrógeno, GNL, HFO y MGO

Cabe destacar del gráfico de la ilustración 53 que la cantidad de emisiones que genera el hidrógeno cuando es producido a raíz de metano, es decir el gris, es comparable al generado por los combustibles residuales, restándole sentido a su utilización. Mientras que el hidrógeno verde, con origen en la electrólisis del agua, tiene emisiones casi nulas gracias a haber empleado energía renovable en el proceso. Este hecho hace evidente la necesidad existente en crear una infraestructura de producción de energía renovable mucho más potente a la actual y que debe preceder a la expansión del hidrógeno verde como combustible para buques.

4.3.5. Pila de combustible de hidrógeno

El uso de motores de combustión interna alimentados por hidrógeno en debe tomarse como una solución provisional y previa a la descarbonización completa de la industria, ya que la verdadera protagonista de la tecnología del hidrógeno es la pila de hidrógeno, en inglés llamada la 'fuel cell'.

De hecho, la **pila de hidrógeno** es mucho más antigua de lo que a priori se podría pensar, ya que fue en 1839 cuando el químico galés William R. Grove, al hacer pasar hidrógeno y oxígeno por dos electrodos de platino parcialmente sumergidos en ácido sulfúrico creó sin saberlo la primera de la historia. Aunque era tosca y poco eficiente, con ella se logró

demostrar que la electrólisis del agua era reversible, es decir, se puede generar al mismo tiempo agua y electricidad, pero este hallazgo no fue suficiente para despertar el interés de los científicos de la época y pasó desapercibido durante los 100 años posteriores.

Durante la década de los años 50, el científico inglés Francis Thomas Bacon rescató el descubrimiento de Groove para construir una planta energética con capacidad de 5 KW empleando una pila alcalina. Esta pila estaba formada por un ánodo de níquel, un cátodo de óxido de níquel y litio y un electrolito de hidróxido de potasio y era capaz de hacer funcionar una máquina de soldadura. Posteriormente, el programa espacial de Estados Unidos mostró interés en la pila de combustible de hidrógeno para incluirla y proporcionar electricidad y agua potable a los astronautas durante las misiones espaciales.

En la actualidad, los esfuerzos de la ciencia se han dirigido a hacer que la pila de hidrógeno sea capaz de generar la suficiente energía eléctrica como para poder prescindir de los combustibles fósiles, cuyo uso ha generado enormes problemas ambientales. Para explicar su funcionamiento se hará referencia a la siguiente figura:

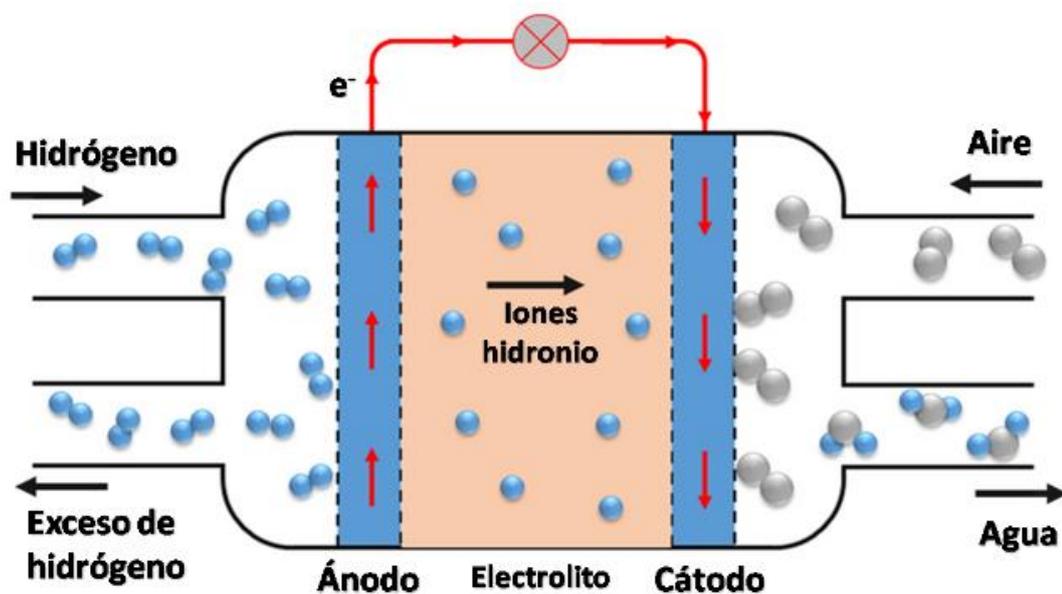


Ilustración 54: Pila de combustible de hidrógeno

- **Suministro de hidrógeno:** es necesario para el funcionamiento de la pila y este se almacena en tanques externos a alta presión, baja temperatura o una combinación de ambas condiciones.
- **Suministro de oxígeno:** este se obtiene del aire del ambiente.
- **Electrodo anódico:** en el ánodo, correspondiente al polo positivo, el hidrógeno se divide en protones y electrones. Seguidamente, los protones pasan al electrolito mientras que los electrones siguen su camino a través de un circuito externo, generando de esta manera una corriente eléctrica. Se genera la reacción:

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$

- **Electrolito:** se encuentra entre ambos polos y sirve como membrana para que los protones, los iones de hidrógeno, se desplacen a través de él desde el ánodo hasta el cátodo. Además, evita que los electrones se precipiten al cátodo directamente y que así se genere la corriente eléctrica. La reacción es la siguiente: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow H_2O$
- **Electrodo catódico:** en el cátodo, el polo negativo de la pila, los protones y los electrones que regresan del circuito externo se combinan con el oxígeno extraído del aire, generando como subproducto agua.

Tras el proceso, la energía eléctrica generada puede emplearse para alimentar motores eléctricos, sistemas de propulsión o cualquier otro dispositivo según su aplicación, con la principal ventaja de no emitir ningún tipo de emisión contaminante y siendo completamente neutro para la atmósfera. Los motores de combustión que emplean hidrógeno no alcanzan este punto de cero emisiones debido al uso de lubricantes, los cuales son los responsables de las emisiones de NOx y partículas generadas, pero con la pila de combustible la única emisión producida es agua pura.

Otra ventaja de emplear el hidrógeno como vector energético, es que, debido a su elevada densidad energética, de 40 kW/Kg, **es capaz de almacenar 236 veces más energía que el litio**, por lo que se pueden eliminar las baterías del sistema de alimentación de propulsores ya que el hidrógeno permite una mejor autonomía con menor peso. En el gráfico posterior, una comparativa entre la relación peso/autonomía de las baterías de iones de litio y el hidrógeno como combustible:

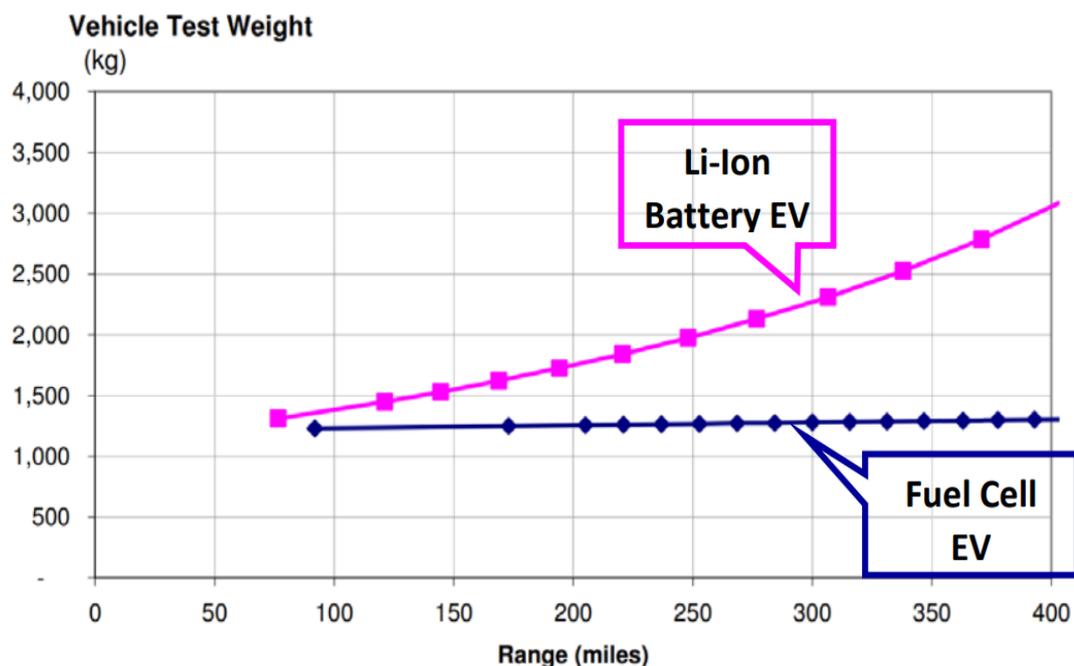


Ilustración 55: Comparativa Peso/Autonomía baterías de litio y pila de hidrógeno

4.3.6. Almacenamiento del hidrógeno

El principal problema que presenta el uso del hidrógeno es la dificultad para **almacenarlo en estado líquido**, ya que se requiere de tanques criogénicos o de alta presión.

Dependiendo del uso final que se le quiera dar al hidrógeno, los sistemas de almacenamiento y las condiciones de los mismos cambiarán. Por ejemplo, cuando es empleado para la producción energética y térmica, existen muchas menos limitaciones en cuanto a volumen, peso y superficie ocupada. En cambio, cuando se quiere emplear como combustible para la propulsión de un buque, el espacio pasa a ser limitado y el peso constituye un factor decisivo que hará que se use o no, por lo que el almacenamiento del hidrógeno crea muchas más dificultades.

Cabe señalar, que con motivo de las cualidades física y químicas del hidrógeno; ya que se trata de un gas combustible, altamente inflamable, incoloro, inodoro e insípido, hacen que la seguridad sea la prioridad al seleccionar un sistema de almacenamiento a bordo. Al igual que el gas natural licuado, al tratarse de una sustancia licuada tan volátil, aparece el riesgo de producirse una explosión BLEVE al almacenarlo en un espacio confinado, por lo que deben existir rigurosos protocolos para su correcta utilización.

El almacenamiento a alta presión es la manera más expandida y estudiada de almacenar hidrógeno ya se han diseñado distintos tipos de depósitos que lo almacenan bajo distintas condiciones. A la hora de elegir uno de ellos es importante tomar en cuenta el uso que se le quiere dar al hidrógeno para encontrar la configuración más óptima.

- **Tipo I:** son recipientes fabricados en metal capaces de soportar presiones de entre 150 y 300 bar. En la actualidad son los más extendidos y baratos y son empleados para almacenar el hidrógeno destinado a usos industriales.
- **Tipo II:** son los que más presión son capaces de soportar, pudiendo llegar a los 1000 bar y son usados como depósitos de alta presión para las hidrogeneras. Cuentan con un revestimiento metálico de gran grosor y son envueltos en fibra de vidrio y carbono.
- **Tipo III:** están diseñados para aplicaciones portátiles por lo que en su fabricación se emplea fibra de carbono para ahorrar peso y soportar los esfuerzos mecánicos. Capaces de soportar hasta 700 bar de presión y cuentan con un revestimiento metálico interno para evitar las fugas.
- **Tipo IV:** también para usos portátiles y contruidos con fibras de carbono dispuestas en distintas direcciones para soportar los esfuerzos generados por el hidrógeno comprimido a 700 bar en su interior. Cuenta con un revestimiento de polietileno de alta densidad en el interior para evitar fugas por difusión y tienen válvulas para el suministro y la recarga del hidrógeno.

A continuación, la ilustración 56 muestra los diferentes tanques de alta presión:

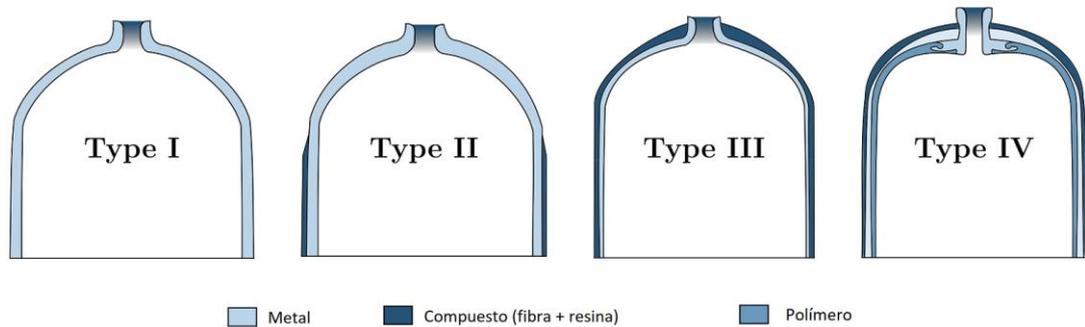


Ilustración 56: Tipos de tanques de almacenamiento de hidrógeno

Los depósitos de tipo III y IV son mucho más ligeros que los de tipo I y II gracias al uso de fibra de carbono en su construcción y lo que los hace óptimos para usos en automóviles y buques. Sin embargo, esto también los encarece debido a una mayor complejidad en su fabricación.

En la siguiente ilustración se muestran los tanques de hidrógeno utilizados por el Toyota Mirai, un coche de producción en serie que usa pila de hidrógeno y que cuenta con dos tanques de tipo IV que suman una capacidad total de 112.4 litros de hidrógeno licuado.



Ilustración 57: Tanques de hidrógeno tipo IV del Toyota Mirai

El hidrógeno es la segunda sustancia más volátil del universo, únicamente por detrás del helio, y su temperatura de criogenización es de 20 Kelvin, es decir de **-253°C**, y a partir de los -260°C pasa a estado sólido. Por tanto, para poder mantenerlo en su **estado líquido** a presión atmosférica es necesario someterlo a estas bajas temperaturas.

No obstante, durante el proceso de licuefacción del hidrógeno, el consumo energético teórico según el ciclo de Carnot es de 3.3 kWh/Kg, pero en la práctica este valor se triplica hasta alcanzar los 10 kWh/Kg de consumo. Esto constituye el principal motivo por el cual el

hidrógeno criogenizado no puede establecerse como el método de almacenamiento a gran escala en un futuro, ya que se perdería el 30% del contenido energético de este combustible.

Además, actualmente no se posee la tecnología para mantener el hidrógeno criogenizado durante períodos alargados de tiempo. BMW, en su modelo Serie 7 de hidrógeno, fue capaz de mantenerlo criogenizado durante 14 horas antes de que este comenzara a expandirse al aumentar su temperatura, escapando del depósito en forma de gas sin ningún tipo de riesgo y al cabo de entre 12 a 14 días, la totalidad del combustible se había evaporado.

Otro método de almacenamiento, aunque hoy en día sigue estudiándose, es el basado en materiales y se clasifica en dos técnicas diferentes: la absorción en la superficie de sólidos y la absorción del hidrógeno atómico dentro de dichos sólidos.

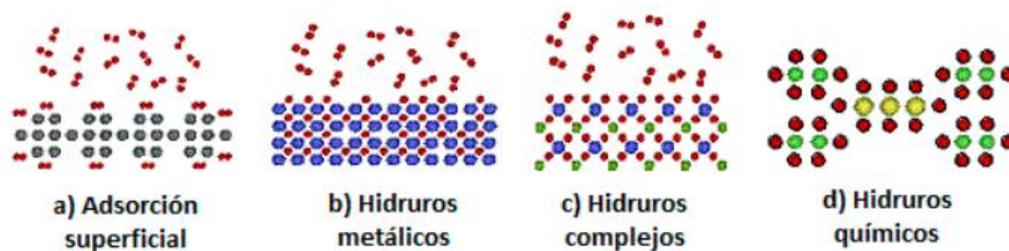


Ilustración 58: Técnicas de almacenamiento de hidrógeno en materiales

De las **técnicas basadas en materiales**, la que mayor posibilidades brinda es por absorción en superficie de sólidos ya que de esta manera se requieren de menos tratamientos al emplear el hidrógeno respecto de los otros métodos que al tener el hidrógeno en el interior de su estructura molecular, se deben aplicar tratamientos que separen y filtren únicamente el hidrógeno, todo ello sin emitir gases contaminantes. Además, este tipo de almacenamiento hace que se pierda buena parte de la densidad energética del combustible, haciendo que para conseguir la misma cantidad de energía que con el hidrógeno a alta presión, haya que transportar mucha más cantidad con el añadido del peso del sólido que lo transporta. Por ello la distribución del hidrógeno empleando este método se dificulta en gran medida.

No obstante, las investigaciones en sistemas de almacenamiento en materiales siguen buscando nuevas vías en las que pueda resultar eficiente para el futuro y que permita aprovechar los sistemas de los que se disponen actualmente para el transporte de combustibles convencionales. Este último aspecto supondría un punto de inflexión y aceleraría la conversión hacia el hidrógeno como combustible, por ello la insistencia de los investigadores en explorar esta vía.

En la tabla de la ilustración 59, se puede comparar las distintas maneras disponibles de almacenar el hidrógeno, tanto a alta presión como criogenizado, como almacenado en distintos materiales. Se aprecia que, al introducirlo en materiales, se pierde la mayor parte de la energía del hidrógeno por lo que no resulta útil, frente al 100 % de la energía que se conserva estando almacenado a alta presión o baja temperatura.

Material	Densidad gravimétrica (% masa)	Densidad volumétrica (kg/m ³)
H₂ gas a 700 bar	100	50
H₂ líquido	100	70
LaNi₅	1.5	120
FeTi	1.5	110
MgH₂	7.6	105
LiH	12.6	100
NaAlH₄	7.5	95
NH₃BH₃	19.6	100
LiBH₄	18.4	120

Ilustración 59: Densidades de diversos métodos de almacenamiento

Por las propiedades del hidrógeno, si se quiere disponer de él como combustible producido a gran escala, es vital adoptar una serie de **medidas de seguridad**.

En primer lugar, es necesario instruir a la tripulación sobre los procedimientos a cumplir en caso de producirse una situación de riesgo en relación con el hidrógeno, además de disponer de dispositivos a bordo que mantengan la seguridad.

El hidrógeno es una sustancia incolora, inolora e insípida es decir que no es posible detectar una fuga a simple vista por lo que se requiere de un sistema de detección de fugas. Además, las fugas en el almacenamiento del hidrógeno a alta presión podrían desencadenar explosiones muy violentas debido a la ebullición del hidrógeno licuado, lo que pone especial importancia a la rápida detección y mitigación de cualquier tipo de fugas. Al tratarse también de un elemento extremadamente ligero sometido a altas presiones, el material con el que son construidos los tanques de almacenamiento debe tenerse muy en cuenta ya que el hidrógeno es capaz de debilitar la estructura molecular de ciertos metales, resultando en grandes fugas y el aumento del riesgo de explosión. Para eliminar este riesgo, los tanques que lo almacenan con altas presiones deben contar con un recubrimiento interior, el cual normalmente es un polímero de alta densidad.

Otra característica del hidrógeno es la facilidad de su ignición, ya que esta requiere de una energía mínima muy baja. Cualquier chispa que se produzca en el interior de los tanques puede tener fatales consecuencias por lo que se deben instalar tomas de tierra y procedimientos a bordo que eliminen las posibles fuentes de ignición. El hidrógeno tampoco es respirable, así que su acumulación en un espacio confinado resultaría en el desplazamiento del oxígeno del lugar. Los sistemas de ventilación a bordo y en especial en lugares confinados evitan que el gas se acumule creando una atmósfera irrespirable.

4.3.7. Buques de hidrógeno actuales

El uso del hidrógeno para la propulsión de buques mercantes continúa en proceso de experimentación ya que aún no se ha conseguido que sea rentable para las navieras el uso de este, además de por la falta de una infraestructura de distribución a nivel mundial. Sin embargo, sí que existen embarcaciones que actualmente son propulsadas por esta tecnología.

- **New York Hornblower Hybrid:** es un catamarán propiedad de Hornblower Cruises, el cual se impulsa mediante una combinación de pilas de combustible de hidrógeno (32 kW), paneles solares (20 kW) y dos turbinas eólicas (5 kW). Esta embarcación ha sido reconocida por su innovación al ser uno de los primeros en utilizar hidrógeno como fuente de energía. Con una longitud de 51,2 metros, una manga de 12,2 metros y una capacidad para transportar hasta 600 pasajeros, el Hornblower Hybrid ha establecido un hito en el año 2011 al demostrar la viabilidad de esta tecnología en la industria de los cruceros.



Ilustración 60: Catamarán New York Hornblower Hybrid

- **REM Energy:** se trata de un buque de operaciones de servicio (SOV) de reciente introducción, ha sido equipado con tecnología avanzada de pilas de hidrógeno y baterías, lo que le permite operar sin emisiones. El buque puede integrar una batería de 12 MW, lo que reduce el consumo de energía durante sus operaciones. Además,

está diseñado para funcionar con cero emisiones utilizando hidrógeno verde o recurriendo a baterías y a la carga en alta mar. Tiene 90 metros de eslora y unos 20 de manga, por lo que se trata de un buque de dimensiones considerables. La función principal de esta SOV es prestar servicios de mantenimiento y apoyo a los parques eólicos marinos Global Tech I y Trianel Windpark Borkum I, situados en el Mar del Norte. El puerto base de REM Energy es Bremerhaven (Alemania).



Ilustración 61: Buque de servicio REM Energy

- **MF Hydra:** propiedad de la naviera noruega NORLED, en buque de 82,4 metros de eslora y entregado en 2021, puede transportar hasta 300 pasajeros y 80 vehículos. Podrá viajar a una velocidad de 9 nudos gracias a sus dos pilas de combustible de 200 kW, dos generadores de 440 kW y dos propulsores Shottel. El transbordador cuenta con un tanque de almacenamiento de hidrógeno de 80 m³, que debería permitirle reducir sus emisiones anuales de carbono hasta en un 95%. Norled colaboró con varios socios extranjeros para lograr este hito. Los sistemas de hidrógeno a bordo fueron suministrados por la empresa alemana Linde Engineering.



Ilustración 62: MF Hydra

5. Conclusiones

Tras la labor de investigación que se ha realizado, en primer lugar, se ha de destacar la importancia del transporte marítimo en la sociedad actual. Ya no únicamente por el gran volumen de mercancía transportada, sino también por el sistema de consumo basado en un mercado globalizado el cual exige un método de transporte capaz de sustentarlo. Por este motivo, es importante que el sector marítimo tenga en cuenta la situación ambiental actual y emprenda un camino hacia la descarbonización de la industria como se ha venido haciendo hasta ahora por medio de las legislaciones de organismos internacionales.

La introducción de estas nuevas normativas, como la IMO 2020 o la 'Regulación 13' de la MARPOL, han provocado que las grandes navieras se movilicen e investiguen distintas vías para lograr una navegación más limpia y neutra con el medio ambiente. Las alternativas actuales pasan por combustibles basados en los tradicionales combustibles residuales, pero con menor porcentaje de azufre u otros más numerosos como el gas natural licuado los cuales si bien son bastante más limpios que los fuelóleos pesados usados históricamente por la industria, más que una solución real al problema, desde mi punto de vista, se trata de una adaptación a la legislación con el único objetivo de cumplir la normativa vigente.

Por otra parte, tanto la industria marítima como muchas otras, como es la automotriz, se encuentran desarrollando un sistema de electrificación de los sistemas de propulsión. Este sistema no será el que lleve a las industrias al nivel de cero emisiones ya que si bien no se producen emisiones contaminantes allá donde se usa la energía, en los lugares donde se produzca se seguirá emitiendo gases de efecto invernadero. Además, tenemos el problema adicional de las baterías, las cuales llevan un proceso de reciclaje muy complejo y que, si se basara toda la industria en un sistema electrificado en el que el almacenamiento de la energía se haga en baterías, generaría un gran impacto al medio ambiente. Por estos motivos no creo que la electrificación sea el camino correcto a tomar hacia un futuro des carbonizado.

Tomando en consideración todo lo mencionado anteriormente, el combustible que, a mi juicio, llevará a la industria a eliminar la huella ambiental, será el hidrógeno empleado en pilas de combustible. Como punto intermedio entre la actualidad y el futuro de cero emisiones se puede emplear el hidrógeno en los motores de combustión de los que se dispone actualmente hasta que, como fruto de la investigación y el desarrollo de esta tecnología, se logre abaratar la producción de las pilas de combustible. Por ello para un futuro impulsado por el hidrógeno, sin duda, es necesaria más inversión, especialmente en energías renovables puesto que estas serán las únicas que puedan asegurar la producción necesaria de hidrógeno

verde. Además de continuar con las legislaciones y normativas que en los últimos años han promovido las organizaciones internacionales.

Bibliografía

1. Caro, R. V. (2022, octubre 21). El hidrógeno en el ámbito marítimo: posibilidades del buque de hidrógeno. Fundación Exponav en Ferrol; Fundación Exponav. <https://exponav.org/blog/puertos-y-buques/el-hidrogeno-en-el-ambito-maritimo-posibilidades-del-buque-de-hidrogeno/>
2. de Prensa, D. (2023, febrero 3). El puerto de Tenerife suma una planta de suministro de hidrógeno verde a su apuesta por la descarbonización. Autoridad Portuaria de Santa Cruz de Tenerife. <https://www.puertostetenerife.org/el-puerto-de-tenerife-suma-una-planta-de-suministro-de-hidrogeno-verde-a-su-apuesta-por-la-descarbonizacion/>
3. Efectiva, P., & Empleo, V. A. Y. (s. f.). EL IMPACTO ECONÓMICO DEL SECTOR MARÍTIMO ESPAÑOL. Gob.es. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/386/Arturo%20Gonz%C3%A1lez.pdf>
4. El 83% de toda la capacidad instalada a nivel mundial fue renovable en 2022 - Energía - Otras. (s. f.). Energética XXI, revista de noticias de energía, biomasa, eólica, fotovoltaica, solar, autoconsumo. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://energetica21.com/noticia/el-83porciento-de-toda-la-capacidad-instalada-a-nivel-mundial-fue-renovable-en-2022>
5. Es, E. (2019, junio 4). El transporte marítimo contamina miles de veces más que el terrestre. elDiario.es. https://www.eldiario.es/opinion/tribuna-abierta/transporte-maritimo-contamina-miles-terrestre_129_1517031.html
6. España, el segundo país de Europa con más emisiones de carbono en sus puertos. (2022, febrero 3). EFEverde. <https://efeverde.com/espana-el-segundo-pais-de-europa-con-mas-emisiones-de-carbono-en-sus-puertos/>
7. España es el segundo país europeo con más emisiones en el sector del transporte marítimo. (2019, diciembre 9). EFEverde. <https://efeverde.com/espana-segundo-pais-europeo-mas-emisiones-maritimas-transito/>
8. Ferrer, J. L. (2021, febrero 22). Los primeros buques 100% eléctricos ya surcan los mares. Verde y Azul. <https://verdeyazul.diarioinformacion.com/los-primeros-buques-100-electricos-ya-surcan-los-mares.html>
9. Global 20 Ports Average. (s. f.). Ship & Bunker. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://shipandbunker.com/prices/av/global/av-g20-global-20-ports-average>
10. Global scrubber washwater discharges under IMO's 2020 fuel sulfur limit. (2021, abril 29). International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/global-scrubber-washwater-discharges-under-imos-2020-fuel-sulfur-limit/>

11. Gómez, L., & Álvarez, Á. (2021, junio 18). El transporte marítimo se encarece un 328% por el Covid y el atasco en China. *elEconomista*. <https://www.eleconomista.es/empresas-finanzas/noticias/11280696/06/21/El-transporte-maritimo-se-encarece-un-328-por-el-Covid-y-el-atasco-en-China.html>
12. HEADLINE FIGURES. (s. f.). Renewable capacity highlights. Irena.org. Recuperado 17 de mayo de 2023, de https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_RE_Capacity_Highlights_2022.pdf?la=en&hash=6122BF5666A36BEC5AAA2050B011ECE255B3BC7
13. Hernández, L. (2022, noviembre 3). Maersk apuesta por el hidrógeno verde español con una inversión de 10.000 millones de euros. Ediciones EL PAÍS S.L. https://cincodias.elpais.com/cincodias/2022/11/02/companias/1667405096_525201.html
14. iContainers. (2017, septiembre 22). El transporte marítimo representa el 90% del comercio mundial. iContainers. <https://www.icontainers.com/es/2017/09/22/transporte-maritimo-representa-90-del-comercio-mundial/>
15. IMO 2020 - cleaner shipping for cleaner air. (s. f.). Imo.org. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/34-IMO-2020-sulphur-limit-.aspx>
16. IMO Tier III Nitrogen Oxide (NOx) emission compliance. (s. f.). Ukpandi.com. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://www.ukpandi.com/news-and-resources/articles/2022/imo-tier-iii-nitrogen-oxide-nox-emission-compliance/>
17. Kuang, Y., Kenney, M. J., Meng, Y., Hung, W.-H., Liu, Y., Huang, J. E., Prasanna, R., Li, P., Li, Y., Wang, L., Lin, M.-C., McGehee, M. D., Sun, X., & Dai, H. (2019). Solar-driven, highly sustained splitting of seawater into hydrogen and oxygen fuels. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(14), 6624-6629. <https://doi.org/10.1073/pnas.1900556116>
18. Maps of MARPOL Annex VI emissions control areas. (2014, marzo 3). CR Ocean Engineering. <https://www.croceanx.com/about-us/514-2/>
19. Marine Environment Protection Committee (MEPC) – 79th session, 12-16 December 2022. (s. f.). Imo.org. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC-79th-session.aspx>
20. Mathur, A. (2020, julio 2). Selective catalytic reduction (SCR) reactors for Ships - types, working principle, advantages and disadvantages. *Marine Insight*. <https://www.marineinsight.com/tech/selective-catalytic-reduction-scr-reactors-for-ships-types-working-principle-advantages-and-disadvantages/>

21. Nnabuife, S. G., Ugbeh-Johnson, J., Okeke, N. E., & Ogbonnaya, C. (2022). Present and projected developments in hydrogen production: A technological review*. *Carbon Capture Science & Technology*, 3(100042), 100042. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100042>
22. Normativa IMO 2020: efectos y consecuencias en el transporte marítimo de mercancías. (s. f.). Mimpocom. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://www.mimpocom/articulo/normativa-imo-2020-efectos-y-consecuencias-en-el-transporte-maritimo-de-mercancias>
23. Oliveira, J. A. (2022, diciembre 24). El MS Medstraum, el primer ferry 100% eléctrico, Ship of the Year del 2022 en Noruega. VA DE BARCOS. <https://vadebarcos.net/2022/12/24/el-ms-medstraum-el-primer-ferry-100-electrico-ship-of-the-year-del-2022-en-noruega/>
24. Óxidos de azufre (SOx) – Regla 14. (s. f.). Imo.org. Recuperado 17 de mayo de 2023, de [https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx](https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx)
25. Óxidos de nitrógeno (NOx) – Regla 13. (s. f.). Imo.org. Recuperado 17 de mayo de 2023, de [https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93-Regulation-13.aspx)
26. Pérez, L. (s. f.). Métodos de almacenamiento del hidrógeno. Synerhy.com. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://synerhy.com/2022/02/metodos-de-almacenamiento-del-hidrogeno/>
27. Qué son los scrubbers y para qué se utilizan. (2019, febrero 18). Bilogistik -. <https://www.bilogistik.com/blog/que-son-scrubbers-para-que-utilizan/>
28. Renewable capacity statistics 2022. (s. f.). Irena.org. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022>
29. Resumen ejecutivo – World Energy Outlook 2022 – Analysis. (s. f.). IEA. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/executive-summary?language=es>
30. Rodríguez, H. (2019, marzo 21). Obtienen hidrógeno combustible a partir del agua del mar. National geographic. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/obtienen-hidrogeno-combustible-a-partir-agua-mar_14046
31. ¿Sabe qué es el transporte marítimo y por qué es tan importante para el comercio exterior? (2018, junio 5). JAH Insurance. <https://www.jahinsurance.com/sabe-que-es-el-transporte-maritimo-y-por-que-es-tan-importante-para-el-comercio-exterior/>
32. Sánchez, N. (s. f.). El Gas Natural Licuado (LNG) y la Tecnología de los motores Wärtsilä Dual-Fuel (DF). Blogspot.com. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <http://maquinasdebarcos.blogspot.com/2012/02/el-gas-natural-liquado-Ing-y-la.html>

33. Santiago, O. (2022, febrero 20). Tecnologías para la producción de hidrógeno - Los colores del hidrógeno. Apilados; Oscar Santiago. <https://apilados.com/blog/tecnologias-para-la-produccion-de-hidrogeno-los-colores-del-hidrogeno/>
34. Sector transporte. (s. f.). Gob.es. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/transporte.aspx>
35. Statista - El portal de estadísticas. (s. f.). Statista. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://es.statista.com/buscar/?q=transporte+mar%C3%ADtimo&Buscar=&qKat=search&newSearch=true&p=1>
36. Structuralia. (s. f.). Cómo se realiza el transporte del gas natural. Structuralia.com. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://blog.structuralia.com/el-transporte-del-gas-natural>
37. Sunrgyze – Fotoelectrocatalisis. (s. f.). Sunrgyze.com. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://sunrgyze.com/>
38. Tamim, B. (2023, abril 2). «MF Hydra»: World's first liquid hydrogen-powered ferry gets operational. Interesting Engineering. <https://interestingengineering.com/transportation/mf-hydra-worlds-first-liquid-hydrogen-powered-ferry>
39. Tráfico marítimo: carga mundial transportada en contenedores 2017. (s. f.). Statista. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://es.statista.com/estadisticas/598872/trafico-maritimo-mundial-con-contenedores/>
40. Transporte marítimo. (s. f.). Ign.es. Recuperado 17 de mayo de 2023, de https://atlasnacional.ign.es/wane/Transporte_mar%C3%ADtimo
41. Tsakiris, A. (s. f.). Analysis of hydrogen fuel cell and battery efficiency. Unepccc.org. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://c2e2.unepccc.org/wp-content/uploads/sites/3/2019/09/analysis-of-hydrogen-fuel-cell-and-battery.pdf>
42. Ubiria, L., Director, J. M., & Aurre, A. (s. f.). ELECTRIFICACIÓN DE BUQUES. Ehu.es. Recuperado 17 de mayo de 2023, de https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/52686/TFM_JesusMariaLopezUbiria.pdf?sequence=1
43. Yara Birkeland. (2021, noviembre 12). Yara None. <https://www.yara.com/news-and-media/media-library/press-kits/yara-birkeland-press-kit/>
44. Zonas marinas especialmente sensibles. (s. f.). Imo.org. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://www.imo.org/es/OurWork/Environment/Paginas/PSSAs.aspx>
45. (S. f.-a). Elperiodicodelaenergia.com. Recuperado 17 de mayo de 2023, de <https://elperiodicodelaenergia.com/las-renovables-representaron-el-81-de-la-nueva-capacidad-de-energia-en-2021/>

Permiso de divulgación del Trabajo Final de Grado

El alumno **Eduardo Dorta Delgado**, autor del trabajo final de Grado titulado “**Vías Para La Transición Energética Del Sector Marítimo**”, y tutorizado por el/los profesor/es **Alejandro U. Gómez Correa**, a través del acto de presentación de este documento de forma oficial para su evaluación, manifiesta que **PERMITE** la divulgación de este trabajo, una vez sea evaluado, y siempre con el consentimiento de su tutor, por parte de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, del Departamento de Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima y de la Universidad de La Laguna, para que pueda ser consultado y referenciado por cualquier persona que así lo estime oportuno en un futuro.

Esta divulgación será realizada siempre que ambos, alumno y tutor/es del Trabajo Final de Grado, den su aprobación. Esta hoja supone el consentimiento por parte del alumno, mientras que el profesor, si así lo desea, lo hará constar en futuras reuniones, una vez finalizado el proceso de evaluación del mismo.