

# Análisis de las nuevas directrices de la OMI para la descarbonización del transporte marítimo.

Trabajo Final de Máster (Master Thesis)



Facultat de Nàutica de Barcelona  
Universitat Politècnica de Catalunya

Trabajo realizado por:  
**Anais Ramos Aguado**

Dirigido por: Dr. Santiago Ordás Jiménez  
**Director o directora**  
**Co-Director o co-directora**

Màster en Gestió de Operacions e Instal·lacions Energètiques  
Marítimes

Barcelona, 2022

Departamento de Ciencias e Ingenierías Náuticas

Versió	Data	Modificacions
1	[Data]	Creació del document
		Revisió...

Escrit per:	
Autor/a:	
Data:	

Revisat i aprovat per:	
Tutor/a:	
Data:	
Revisat i aprovat per:	
Co-Tutor/a:	
Data:	

## Resumen

El presente estudio parte de un análisis del impacto ambiental del transporte marítimo especialmente en lo que respecta a la contaminación atmosférica a escala internacional y en un escenario delimitado por rutas y mares regionales de la Unión Europea. A su vez quedan identificados los aspectos que influyen en las emisiones de GEI de los buques y las principales fuentes de emisiones a bordo. Seguidamente se analiza el marco normativo, partiendo de un estudio de las Directrices de la Organización Marítima Internacional para la descarbonización del transporte marítimo y su estrategia para reducir las emisiones del sector. El conjunto de enmiendas y regulaciones requerirán que los barcos combinen un enfoque técnico y operativo para mejorar la eficiencia energética y disminuir el consumo de energía. Las tecnologías de propulsión ya disponibles en el mercado son aplicables a buques de nueva construcción y al reacondicionamiento de los existentes, mejoran la eficiencia y contribuyen al ahorro energético del buque.

**Palabras claves:** transporte marítimo; emisiones; descarbonización; estrategia; medidas operativas; medidas tecnológicas; retroadaptaciones; tecnologías de propulsión.; ahorro energético.

## **Abstract**

This study is based on an analysis of the environmental impact of maritime transport, particularly as regards air pollution at international level and in a scenario defined by regional routes and seas of the European Union. In turn, the issues influencing GHG emissions from ships and the main sources of emissions on board are identified. The policy framework is then discussed, based on a review of the International Maritime Organization Guidelines for the Decarbonization of Maritime Transport and its Strategy for Reducing Emissions from the Sector. The package of amendments and regulations will require ships to combine a technical and operational approach to improve energy efficiency and reduce energy consumption. Propulsion technologies already available on the market are applicable to new-build ships and retrofits of existing ships, improve efficiency and contribute to energy savings.

**Keywords:** maritime transport; emissions; decarbonization; strategy; operational measures; technological measures; retrofits; propulsion technologies; energy savings.

*“La transición energética cambia la forma, pero no la importancia del sector naviero para la economía mundial”*

*DNV GL*

## **Siglas y Abreviaturas.**

CCS (carbon capture and storage): captura y almacenamiento de carbono.

CII (Carbon Intensity Indicator): Indicador de la intensidad de carbono.

CLT: Contracted and Loaded Tip Propeller.

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

CO<sub>2</sub> eq: Dióxido de carbono equivalente.

COV: compuestos orgánicos volátiles.

DCS: sistema de recopilación de datos.

DP: posicionamiento dinámico.

DPF: filtro de partículas diesel.

EGCS (Exhaust Gas Scrubber System): Sistema de limpieza de gases de escape.

g: gramos

GT (Gross Tonnage): arqueo bruto.

HFO (Heavy fueloil): combustible pesado.

I+D: Investigación y Desarrollo.

LOA (Length over all): longitud total del buque.

MCR (Maximun Continuous Rating): Potencia Máxima Continua.

MEPC: Comité de Protección del Medio Marino.

MGO (Maritime Gasoil): Gasóleo Marino

MRV (Monitoring, Reporting and Verification): Seguimiento, Notificación y Verificación de la Unión Europea.

N<sub>2</sub>O: óxido nitroso.

NDC (Nationally Determined Contributions): contribuciones determinadas a nivel nacional.

NH<sub>3</sub>: amoníaco

NO<sub>x</sub>: óxidos de nitrógeno.

OMI: Organización Marítima Internacional.

ONU: Organización de las Naciones Unidas.

PICT: Programa integrado de cooperación técnica.

PM: materia particulada.

ppb: partes por billón.

ppm: partes por millón.

PTI (Power take-in): entrada de energía

PTO (Power take-off): salida de energía

Ro-Ro (roll on- roll of): denominación a buques de carga rodada

SCR (Selective Catalitic Reactor): reducción catalítica selectiva.

SEEMP (Ship Efficiency Management Plan): Plan de gestión de la eficiencia energética del buque.

SFOC: consumo específico mínimo de fuelóleo.

SHaPoLi (Shaft Power Limitation): Sistema de limitación de potencia en el eje.

TBT (TriButylTin): tributilo de estaño.

TES (Thermo Efficiency System): Sistema de Eficiencia Térmica.

TOE (Ton of oil equivalents): Toneladas equivalentes de petróleo.

UE: Unión Europea.

VFD, Variable Frequency Drive: variador de frecuencia.

VLSCO (Very Low Sulphur Fuel Oil): combustible de bajo contenido de azufre.

W/m<sup>2</sup>: Magnitud de la Irradiancia, potencia incidente por unidad de superficie.

WHR (Waste Heat Recovery Unit): Unidad de recuperación del calor residual.

## Términos y Definiciones.

*Emisión:* se entiende toda liberación a la atmósfera o al mar por los buques de sustancias sometidas a control.

*Emisiones antropogénicas:* Las actividades humanas generan emisiones de cuatro GEI de larga permanencia: CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y halocarbonos (gases que contienen flúor, cloro o bromo).

*El equivalente de CO<sub>2</sub> o equivalente de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>eq o Carbon Dioxide Equivalent, en inglés),* es una medida en toneladas de la huella de carbono. Huella de carbono es el nombre dado a la totalidad de la emisión de gases de efecto invernadero. La masa de los gases emitidos es medida por su equivalencia en CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono). El CO<sub>2</sub> es el más conocido y es también la referencia del resto de los gases de efecto invernadero, a los que se considera causantes del calentamiento del planeta.

*Zona de control de las emisiones:* se entiende por una zona en la que es necesario adoptar medidas especiales de carácter obligatorio para prevenir, reducir y contener la contaminación atmosférica por NO<sub>x</sub> o SO<sub>x</sub> y materia particulada, o los tres tipos de emisiones, y sus consiguientes efectos negativos en la salud de los seres humanos y el medio ambiente.

Por *fueloil* se entiende cualquier combustible entregado y destinado a la combustión a fines de la propulsión o el funcionamiento a bordo del buque, incluidos los combustibles gaseosos, destilados o residuales.

Por *motor diésel marino* se entiende todo motor alternativo de combustión interna que funcione con combustible líquido o mixto, incluidos los sistemas de sobrealimentación o mixtos, en caso de que se empleen. Además, también se considerará un motor diésel marino todo motor de gas instalado en un buque construido el 1 de marzo de 2016 o posteriormente, o un motor de gas adicional o un motor de sustitución no idéntico instalado en esa fecha o posteriormente.

*Análisis del ciclo de vida (ACV):* es un proceso para evaluar las cargas ambientales asociadas a un sistema de producción o actividad, identificando y cuantificando las cantidades de materia y energía utilizados, y los residuos generados, y evaluando los impactos ambientales derivados de estos.

*Reducción catalítica selectiva (SCR):* es una tecnología de control de emisiones que convierte los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) en nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O) mediante el empleo de un catalizador y un reductor gaseoso, generalmente amoníaco, aplicado en la salida de gases del motor.

*Filtro de partículas diésel (DPF):* elimina las partículas de diésel o el hollín de los gases de escape.

*Well-to-tank (WTT):* Estudios de pozo a depósito que, en el caso de un combustible convencional, abarcan toda la cadena ascendente, desde la producción, la transformación y el transporte hasta la refinería, el refinado, el transporte hasta el buque y las operaciones de abastecimiento de



combustible. Para el GNL, incluye la producción de gas, el procesamiento, la licuefacción y el transporte al cliente final.

*Tank-to-wake studies (TTW)*: Estudios «*Tank-to-wake*» centrados en la combustión de combustibles marinos en función de la tecnología del motor y del combustible. Estos estudios se han centrado a menudo en las zonas de control de emisiones (ECA) existentes, como en Europa del Norte o América del Norte, y sus posibles extensiones. O bien, se han centrado en el desarrollo de tecnologías alternativas y la eficiencia energética térmica relacionada con los hidrocarburos no quemados, como la fuga de metano.

*Well-to-wake (WTW) studies*. Estudios «*Well-to-wake*» que evalúan las emisiones globales del suministro de combustible y la combustión del combustible en los motores de los buques evaluados. Recientemente se han publicado más estudios de WTW sobre combustibles marinos.

*La captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>*: es una tecnología industrial donde el CO<sub>2</sub> es separado tal y como se encuentra en los gases de escape utilizando un solvente (mono-etanolamina, por ejemplo), para su mitigación. La tecnología de postcombustión es la más empleada a nivel industrial.

*Densidad energética*: es la cantidad de energía que puede almacenarse en un sistema, sustancia o región de espacio. La densidad energética puede medirse en energía por volumen o por masa.

## Tabla de contenidos.

RESUMEN .....	3
ABSTRACT.....	4
SIGLAS Y ABREVIATURAS. ....	6
TÉRMINOS Y DEFINICIONES. ....	8
TABLA DE CONTENIDOS. ....	10
LISTADO DE FIGURAS. ....	12
LISTADO DE TABLAS. ....	15
<b><u>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN. ....</u></b>	<b><u>1</u></b>
<b><u>CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE: ESCENARIO ACTUAL Y LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA. ....</u></b>	<b><u>4</u></b>
2.1. GASES PROCEDENTES DEL TRANSPORTE MARÍTIMO. ....	7
2.2. ASPECTOS QUE INFLUYEN EN LAS EMISIONES DE LOS BUQUES. ....	10
2.3. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 2. ....	17
<b><u>CAPÍTULO 3. MARCO NORMATIVO. ....</u></b>	<b><u>18</u></b>
3.1. ACUERDO DE PARÍS.....	19
3.2. PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA OCASIONADA POR LOS BUQUES. ANEXO VI DEL CONVENIO MARPOL.....	20
3.3. LA OMI Y SU ESTRATEGIA PARA LA DESCARBONIZACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO.....	23
3.3.1. COMITÉ DE PROTECCIÓN DEL MEDIO MARINO. ....	24
3.4. MEDIDAS ADOPTADAS PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE GEI PROCEDENTES DEL TRANSPORTE MARÍTIMO. FASES DE IMPLANTACIÓN. ....	24
3.5. ESCENARIO ECONÓMICO.....	28
3.5.1. PRINCIPIOS DE POSEIDÓN. ....	28
3.6. CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 3. ....	30
<b><u>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LA NORMATIVA Y PROPUESTAS TECNOLÓGICAS PARA EL AHORRO DE ENERGÍA. ....</u></b>	<b><u>31</u></b>
4.1. ÍNDICE DE DISEÑO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA: EEDI.....	32
4.1.1. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL EEDI. ....	33
4.2. ÍNDICE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS BUQUES EXISTENTES: EEXI.....	35
4.3. PLAN DE GESTIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LOS BUQUES: SEEMP. ....	36
4.3.1. MARCO Y ESTRUCTURA DE LA PARTE I DEL SEEMP. ....	37

4.3.2.	PLAN DE RECUPERACIÓN DE DATOS SOBRE EL CONSUMO DE FUELOIL DE LOS BUQUES, PARTE II DEL SEEMP. 38	
4.4.	INDICADOR DE LA INTENSIDAD DE CARBONO: CII.....	39
4.5.	PROPUESTAS DE SOLUCIONES TECNOLÓGICAS.....	42
4.5.1.	COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS.....	44
4.5.1.1.	EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO.....	47
4.5.2.	¿CUÁL PODRÍA SER EL MEJOR COMBUSTIBLE PARA LA DESCARBONIZACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO?.....	51
4.5.3.	REDUCCIÓN DE LA VELOCIDAD: ALTERNATIVA INMEDIATA PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE GEI. 55	
4.5.4.	MEJORAS TECNOLÓGICAS DE AHORRO DE ENERGÍA.....	58
4.5.5.	SISTEMAS DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA.....	86
4.5.6.	ANÁLISIS DE COSTOS DE LAS SOLUCIONES TECNOLÓGICAS.....	91
4.6.	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 4.....	101
<b><u>CAPÍTOL 5. ANÁLISIS DE CASOS REALES DE BUQUES CON APLICACIONES DE SOLUCIONES TECNOLÓGICAS.....</u></b>		<b><u>103</u></b>
5.1.	APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA EN CASOS REALES DE BUQUES.....	104
5.2.	RIESGOS FINANCIEROS ASOCIADOS.....	113
5.3.	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 5.....	114
<b><u>CONCLUSIONES GENERALES.....</u></b>		<b><u>115</u></b>
<b><u>BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS.....</u></b>		<b><u>117</u></b>

## Listado de Figuras.

Figura 1: La influencia humana en el calentamiento global. Fuente [1] .....	4
Figura 2: Evolución de la temperatura superficial media global (GMST) durante el período de observaciones instrumentales. [1] .....	5
Figura 3: Tasas de crecimiento anual (barras azules) y decenal (líneas horizontales rojas) de los gases de efecto invernadero en la atmósfera. Fuente [9] .....	6
Figura 4: Emisiones de CO <sub>2</sub> en el transporte marítimo mundial en 2020, por tipo de barco (en millones de toneladas métricas de CO <sub>2</sub> ). Fuente [8] .....	9
Figura 5: Concentraciones de CO <sub>2</sub> en ppm (naranja), de CH <sub>4</sub> en ppb (verde) y N <sub>2</sub> O en ppb (azul) durante los últimos 1000 años. Basadas en mediciones de aire atrapado en hielo y firn antárticos y el registro moderno de Cape Grim. Fuente CSIRO [9] .....	10
Figura 6: Rutas marítimas y mares regionales. Fuente [10] .....	11
Figura 7: Consumo de combustible marino en la UE (2020). Fuente Wood Mackenzie .....	13
Figura 8: Emisiones de CO <sub>2</sub> por tipo de viaje y tipo de buque (basadas en datos del 2019). Fuente [12] .....	16
Figura 9: Factores de reducción del EEDI, fragmentos. Fuente [15] .....	35
Figura 10: Parámetros para el cálculo de los valores de referencia, fragmentos. Fuente [15] .....	35
Figura 11: Escala de clasificación del funcionamiento en cuanto a eficiencia energética operacional. Fuente Anexo 13 [20] .....	42
Figura 12: Densidad energética para diferentes opciones de combustibles. Fuente [24] .....	52
Figura 13: Combustible y coste por tonelada transportada en función de la velocidad y el coste del combustible para un Aframax estándar. Fuente: [27] .....	56
Figura 14: Montaje experimental y vista de fondo de los efectos de la cuña sobre el rendimiento de una embarcación. Fuente [32] .....	59
Figura 15: Hélice Kappel a): detrás del M/T Nordamerika de Dampskibsselskabet Norden, A/S, 35000 TPM, b): Modelo numérico de elementos de contorno de la hélice. Fuente: DTU Mechanical Engineering .....	61
Figura 16: Hélice CLT, a) la nueva hélice CLT con WED preexistente y timón bulbado, del buque cisterna Roy Maersk, 35000 TPM, y b) distribución de la presión en el lado de las presiones (izquierda) y en el lado de la succión (derecha) de las palas de una hélice CLT. Fuente: [34] .....	62
Figura 17: El Queen Mary 2 esta equipado con cuatro Pod Mermaid, dos fijos situados a proa de los dos pod azimutales que le dan gobierno al buque. Fuente propia .....	63

Figura 18: Pareja contra-rotativa compuesta por un propulsor convencional y propulsor Podded. Fuente: ABB, [35] .....	64
Figura 19: Rueda de paleta de rotación libre detrás de la hélice principal (2012). Fuente: DNV GL/HHI [37] .....	65
Figura 20: Hélice con tobera/conducto. Fuente: [38] .....	66
Figura 21: Dispositivo pre-rotación a) de paletas guías, b) Ilustración de la distribución de la presión, tres palas que muestran el lado de la presión y tres palas que muestran la distribución del lado de la succión. Fuente: [39] .....	67
Figura 22: a) Sistema Pre-swirl probado en el Car and Truck Carrier Grande Portogallo, de Grimaldi Lines. Fuente: MarineLog. b) distribución de las líneas de flujo en la hélice y conducto de medio anillo con aleta central. Fuente: Hyundai Heavy Industries [40] .....	68
Figura 23: Dispositivos de giro posterior. a) Timón con bulbo y aleta, b) Sistema de aletas del casquete de hélice. Fuente: JMUC [41].....	69
Figura 24: Timón de compuertas. Fuente: Wartsila [42] .....	69
Figura 25: a) Motor dual fuel 6DZD/Spark Ignited (75 % H2 y 25 % diésel) y b) el proceso de combustión del hidrógeno. Fuente: [44] .....	72
Figura 26: Instalación de hélice principal única en la línea central y un propulsor azimutal en línea, del super yate híbrido Savannah. [46] .....	74
Figura 27: Diagrama de instalación de un sistema de recuperación de energía del calor residual de un buque. Fuente: [47].....	76
Figura 28: Sala de máquina de un buque portacontenedores con sistema WHR, a) sección transversal, b) sección longitudinal. Fuente: [49] .....	77
Figura 29: Sistema de reducción catalítica selectiva NOx PaNOx™ para buques. Fuente: Pansia Co. Ltd [50] .....	79
Figura 30: Tecnología de lubricación por aire, sistema Silverstream®. Fuente: Wartsila [51] .....	80
Figura 31: Ahorro de combustible (%) empleando propulsión eólica. Fuente: Jarle Kramer (NTNU), Smart Maritime Webinar: Wind-assisted propulsion. ....	82
Figura 32: Car Carrier Emerald Ace, híbrido con 780 paneles solares instalados en la cubierta. Fuente: Mitsui O.S.K.Lines. ....	84
Figura 33: Casco Vane, con ala subacuática diseñada a medida que se acopla al espejo de popa de su embarcación. Fuente: [54] .....	85
Figura 34: Instalaciones alternativas de potencia y propulsión para buques. Fuente: Lindstad et al., 2017 [55] .....	88
Figura 35: Esquema 2S con FPP. Fuente Wärtsila (2021).....	109
Figura 36: Esquema 4 x 4S con CPP. Fuente Wärtsila (2021).....	110

Figura 37: Esquema 4S DE o DM. Fuente Wärtsila (2021) ..... 111

Figura 38: Esquema de solución híbrida. Fuente: Wärtsila (2021) ..... 112

## Listado de tablas.

Tabla 1: Total de emisiones de CO2 y consumo de combustible por tipo de buques. Fuente: Datos THETIS MRV UE (2022) .....	14
Tabla 2: Valores límites de emisiones de NOx aplicados a motores marinos diésel. ....	21
Tabla 3: Fases de implantación de la Estrategia Inicial de la OMI. Fuente: [16].....	26
Tabla 4: : Factor de reducción (Z %) para el CII con respecto al nivel de referencia de 2019. Fuente [20] .....	41
Tabla 5 : Impacto ambiental y costos de los combustibles alternativos. Fuente: elaboración propia a partir de los datos obtenidos en [26].....	1
Tabla 6 Reducción de las emisiones como resultado de las restricciones de velocidad en la zona de 12 mn, en la zona de 200 mn y en alta mar. Fuente [10] .....	57
Tabla 7 Categorías de las tecnologías innovadoras de eficiencia energética. Fuente [29].....	58
Tabla 8 Producción de energía mediante células fotovoltaicas. Fuente: [30] .....	83
Tabla 9: Resumen de las medidas de diseño de los buques. Fuente: [56] .....	95
Tabla 10 Resumen de tecnologías alternativas de propulsión y de adaptación. Fuente: [56] .....	96
Tabla 11: Resumen de las tecnologías de motores. Fuente: [56] .....	97
Tabla 12: Resumen de la reducción de las emisiones de captura de carbono y el costo. Fuente:[56] .....	98
Tabla 13: Resumen de las medidas de asistencia energética. Fuente: [56].....	99
Tabla 14: Resumen de las medidas operativas de los buques. Fuente: [56] .....	100





# Capítol 1. Introducció.

La descarbonización del transporte marítimo sigue siendo una tarea desafiante. Para 2050, se prevé y que las emisiones de CO<sub>2</sub> aumenten en un 130% con respecto a los niveles de 2018 (IEA, 2020a). Reducir sus cargas ambientales requerirá el despliegue de tecnologías a un ritmo sin precedentes, reforzado por una política internacional eficaz.

El transporte de mercancías por mar sigue siendo el método más económico y energéticamente eficiente para mover grandes volúmenes de mercancías en todo el mundo, debido al tamaño de los buques modernos. Cada año, el sector marítimo entrega aproximadamente el 80% del volumen de comercio mundial de bienes físicos (UNCTAD, 2019). A pesar de la eficiencia del transporte marítimo, la gran escala de la industria marítima mundial indica que el sector fue responsable de un consumo de combustible de ~635,8 millones de toneladas en el 2018, principalmente de fueloil pesado y diésel marino, lo que lleva a 1 056 millones de toneladas de emisiones de GEI (expresadas en CO<sub>2</sub>eq)

Esto corresponde al ~3% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía, lo que convierte al sector del transporte marítimo en un gran contribuyente al cambio climático. Además, la combustión de los combustibles marinos actuales, especialmente el HFO, produce grandes cantidades de contaminantes atmosféricos, que tienen efectos adversos para la salud de las poblaciones que viven cerca de los puertos.

Los desafíos son significativos, pero la acción internacional está en marcha. La OMI está estableciendo una Estrategia Inicial sobre la reducción de las emisiones de GEI de los buques. Ha puesto en marcha un plan de medidas ambiciosas que se implementarán para un cambio efectivo y reducir el contenido de azufre de los combustibles marítimos, conjuntamente han iniciado acciones para reducir las emisiones de NOx.

Es probable que alcanzar estos ambiciosos objetivos requiera una importante investigación y desarrollo. Las empresas que tradicionalmente no están asociadas con la industria marítima, como las redes de distribución de energía, las instalaciones de producción de amoníaco y las empresas forestales, también estén llevando a cabo proyectos de I+D para ayudar a facilitar la descarbonización del transporte marítimo.

Este informe tiene como objetivo realizar un estudio sobre las Directrices de la OMI para la descarbonización del transporte marítimo y las posibles medidas tecnológicas de mejoras de la eficiencia energética de los buques. En particular, se evalúa una gama de soluciones técnicas y regulatorias que podrían permitir que el sector marítimo cumpla con los objetivos de una política

energética y ambiental, incluida la diversificación energética, la reducción de contaminantes y el ahorro de emisiones de GEI, en correspondencia con el Acuerdo de París, de limitar el aumento de las temperaturas a 1,5°C

En el Capítulo 2 se realiza un análisis de las contribuciones del sector marítimo de emisiones contaminantes a nivel internacional y a nivel europeo, se identifican los aspectos que influyen en las emisiones de los buques analizando desde un escenario comprendido en rutas marítimas y mares de la Unión Europea; se identifican los tipos de buques más contaminantes y las principales fuentes de emisiones a bordo. Los datos numéricos fueron obtenidos de los reportes del THETIS MRV de la UE (2020)

En el Capítulo 3 se plantea el Marco Normativo, que definen los niveles de ambiciones para reducir las emisiones y los principios reguladores descritos en la Estrategia Inicial de la OMI y el programa de medidas adicionales para darle seguimiento. Adicionalmente se exponen las medidas técnicas y operacionales de eficiencia energéticas de carácter obligatorio establecidas en el Anexo VI del Convenio MARPOL. En el último apartado se exponen los principios rectores de las entidades financieras más representativas en el ámbito naviero. Las directrices a las que se hacen referencias fueron descargadas directamente del dominio público del IMODOCS.

Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y los contaminantes atmosféricos del sector marítimo requerirá la adopción generalizada de soluciones tecnológicas. En el Capítulo 4 se realiza el análisis de la normativa y de las propuestas tecnológicas para el ahorro de energía; se comparan los méritos relativos de algunas de estas tecnologías y de los combustibles alternativos, así como su potencial para descarbonizar el transporte marítimo. El análisis fue posible empleando una serie de artículos de carácter científicos y técnicos de las empresas y personalidades de mayor avance en esta temática de las regiones nórdicas y asiáticas.

Además, se incluye una referencia de precios y el porcentaje de ahorro de las soluciones tecnológicas y operacionales a partir de datos recientes, tomando como referencia la estructura ilustrativa de costes de los tres tipos de buques más representativos de la flota mundial: graneleros, petroleros y portacontenedores. Cabe destacar que las estimaciones de costos están en función de los precios del combustible a escala mundial, por lo que dichas estimaciones pueden verse afectadas por las fluctuaciones de los precios de combustible en períodos recientes.

En el Capítulo 5 se exponen algunos ejemplos de casos reales de buques con aplicaciones de tecnológicas ya existentes en el mercado, presentadas por la compañía Wärtsilä, pionera en el desarrollo de tecnologías de combustibles sostenibles y de tecnologías complementarias para la transformación del sector hacia la descarbonización.

Las tablas de elaboración propia contienen los valores reales sobre el ahorro energético obtenido mediante la aplicación de tecnologías complementarias en algunos ejemplos de buques que han sido reestructurados y de buques de reciente construcción. Los datos de consumo y emisiones fueron extraídos de los reportes del THETIS MRV de la UE (2020). También se presenta una descripción de soluciones tecnológicas de propulsión híbrida eléctrica desarrolladas por Wärtsilä

que aportan múltiples beneficios en el funcionamiento de los sistemas de propulsión y garantizan emisiones cero dentro y fuera del puerto. La información sobre las ventajas tecnológicas se obtuvo mediante el acceso a publicaciones por medio de afiliaciones y de la asistencia directa a webinars realizados por expertos de la compañía. Para la validación de la información se contactó con el director del Departamento de Sistemas Eléctricos y de Potencia de Wärtsilä, de quien se obtuvo respuesta inmediata, aportando relevancia al presente estudio.

## Capítol 2. Estado del arte: Escenario actual y la contaminación atmosférica.

No existe una respuesta única a la pregunta de si es factible limitar el calentamiento a 1,5°C y adaptarse a las consecuencias. La transformación global que sería necesaria para limitar el calentamiento a 1,5°C requiere condiciones favorables que reflejen los vínculos, las sinergias y las compensaciones entre la mitigación, la adaptación y el desarrollo sostenible. [1]

La influencia humana en el clima ha sido la causa principal del calentamiento observado desde mediados del siglo XX, mientras que la temperatura superficial promedio global se calentó 0,85°C entre 1880 y 2012. Muchas regiones del mundo ya tienen un mayor calentamiento a escala regional, con un 20%-40% de la población mundial (según el conjunto de datos de temperatura utilizado) que ha experimentado más de 1,5°C de calentamiento en al menos una temporada. Los diferentes tonos de rosa a púrpura indicados en la figura 1 muestran el calentamiento estimado para la temporada que más se calentó en un lugar determinado entre los períodos 1850–1900 y 2006–2015, durante los cuales las temperaturas promedio globales aumentaron 0,91 °C para este conjunto de datos.

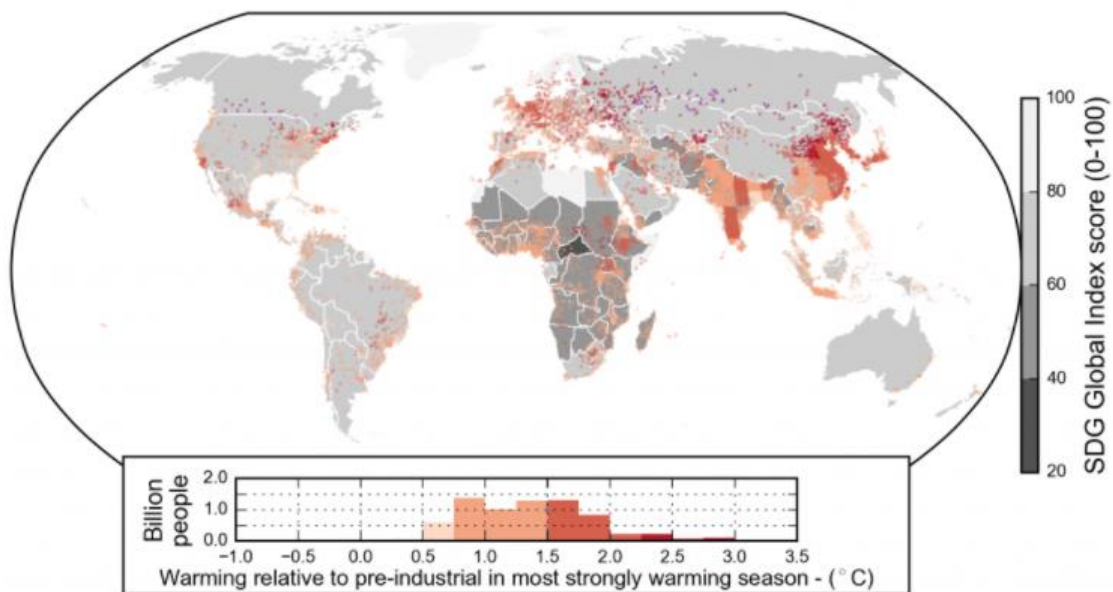


Figura 1: La influencia humana en el calentamiento global. Fuente [1]

El aumento de la temperatura hasta la fecha ya ha provocado profundas alteraciones en los sistemas humanos y naturales, incluido el aumento de las sequías, las inundaciones y algunos otros tipos de condiciones meteorológicas extremas, aumento del nivel del mar, y pérdida de biodiversidad. Estos cambios están causando riesgos sin precedentes para las personas y poblaciones vulnerables. Las islas pequeñas, las megaciudades, las regiones costeras y las altas

cadena montañosa también se encuentran entre las más afectadas. En todo el mundo, numerosos ecosistemas corren el riesgo de sufrir impactos graves, en particular los arrecifes tropicales de aguas cálidas y los ecosistemas árticos.

El calentamiento en un momento dado se define como el promedio global de las temperaturas combinadas del aire en la superficie terrestre y la superficie del mar durante un período de 30 años, [...]. [2] Dado que el nivel de calentamiento está aumentando actualmente a  $0,3^{\circ}\text{C}$  a  $0,7^{\circ}\text{C}$  cada 30 años, el nivel de calentamiento en 2017 fue de  $0,15^{\circ}\text{C}$  a  $0,35^{\circ}\text{C}$  más alto que el calentamiento promedio durante el período de 30 años 1988-2017 [3]. En la figura 2 se muestran los datos de observación que representan la evolución de la temperatura superficial media global como un promedio ponderado de la temperatura del aire cerca de la superficie sobre la tierra y la temperatura de la superficie del mar sobre los océanos.

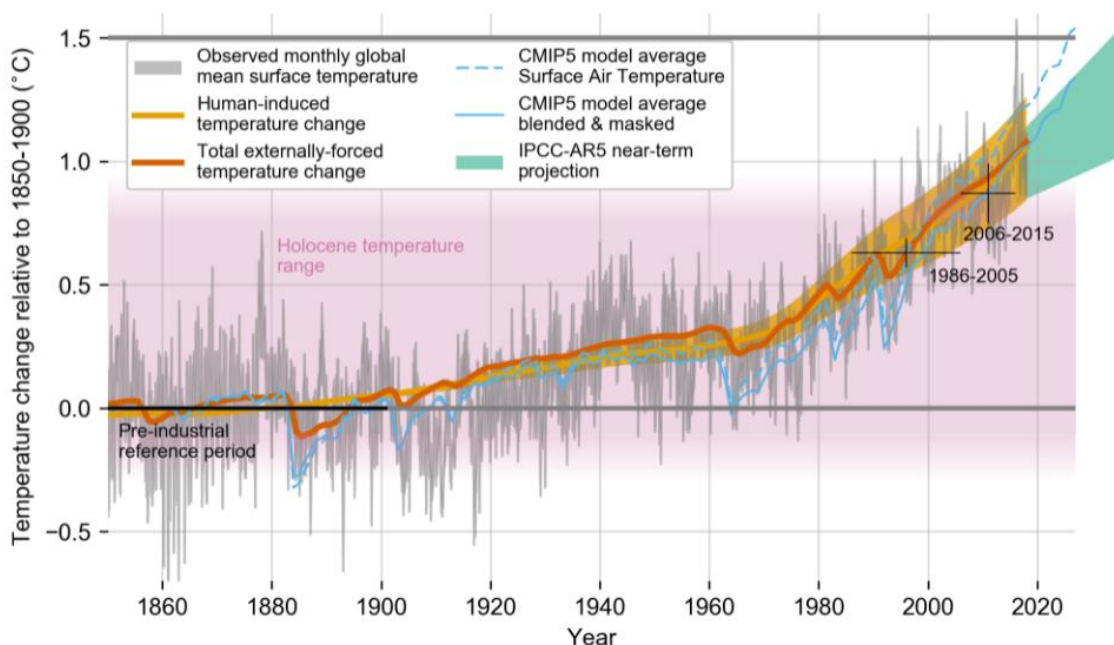
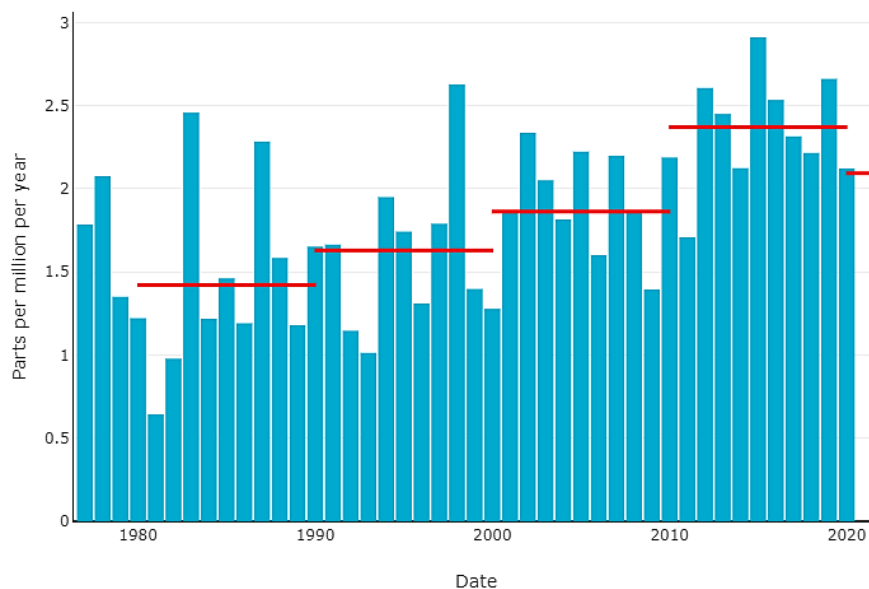


Figura 2: Evolución de la temperatura superficial media global (GMST) durante el período de observaciones instrumentales. [1]

Las emisiones de carbono de las actividades humanas están causando el calentamiento de los océanos, la acidificación y la pérdida de oxígeno con alguna evidencia de cambios en el ciclo de nutrientes y la producción primaria. El calentamiento del océano está afectando a los organismos marinos en múltiples niveles tróficos, afectando a la pesca con implicaciones para la producción de alimentos y las comunidades humanas. Ya se han informado algunas preocupaciones con respecto a la eficacia de la gobernanza existente de los océanos y la pesca, lo que destaca la necesidad de respuestas oportunas de mitigación y adaptación.

Si continúa la tasa de calentamiento actual, el mundo alcanzaría un calentamiento global inducido por el hombre de  $1,5^{\circ}\text{C}$  alrededor de 2040.

En la figura 3 se puede observar la Tasa de crecimiento anual de los Gases de efecto invernadero a nivel global.



**Figura 3: Tasas de crecimiento anual (barras azules) y decenal (líneas horizontales rojas) de los gases de efecto invernadero en la atmósfera. Fuente [9]**

El transporte es la fuente de emisiones de más rápido crecimiento en todo el mundo y ahora representa el 17% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, solo por detrás del sector eléctrico. Dentro de los subsectores del transporte, las emisiones de generadas por los buques representan el 11% del total a nivel mundial.

¿Limitar el calentamiento a 1,5°C es 'factible'? Cuantificar el compromiso de las emisiones pasadas es complicado por el comportamiento muy diferente de los distintos forzadores climáticos afectados por la actividad humana: las emisiones de gases de efecto invernadero de larga duración como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) tienen un impacto muy persistente [4], que dura desde más de un siglo (en el caso del  $\text{N}_2\text{O}$ ) hasta cientos de miles de años (para el  $\text{CO}_2$ ) y, otros gases como el metano ( $\text{CH}_4$ ) y los aerosoles, por el contrario, persisten como máximo durante una década (en el caso del metano) hasta unos pocos días.

Alrededor de 400 gigatoneladas de dióxido de carbono: esa es la cantidad de carbono que el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de la ONU prevé que el mundo tendrá que gastar, con el fin de tener una probabilidad (67%) para limitar el calentamiento global a la ambición de 1,5°C establecida en el Acuerdo de París [5]. Las emisiones deben reducirse aproximadamente a la mitad para el 2030 para un futuro de 1,5°C.

Las reducciones de emisiones pueden interactuar con otras dimensiones del desarrollo sostenible. En particular, las acciones tempranas (como la reducción de las emisiones de dióxido de azufre) pueden tener beneficios colaterales considerables para la sociedad, como la reducción de la

contaminación del aire y la mejora de la salud pública con los beneficios económicos asociados. Los esfuerzos para reducir o prevenir la emisión de gases de efecto invernadero, o para mejorar la absorción de los gases ya emitidos, requiere el uso de nuevas tecnologías, fuentes de energía limpia, reducción de la deforestación, mejores métodos agrícolas sostenibles y cambios en el comportamiento individual y colectivo.

El mundo necesita una transición más rápida hacia un sistema energético profundamente descarbonizado, reduciendo sustancialmente las emisiones año tras año. Esto requerirá un cambio de mentalidad, revoluciones tecnológicas y de comportamiento, innovación, políticas con visión de futuro y grandes inversiones. Lo que es más importante, consideramos que una transición conforme a lo dispuesto en París es asequible: el mundo tiene la capacidad financiera para acelerar la transición. [6] Esto requerirá una movilización masiva y una reorientación del capital de los combustibles fósiles hacia la energía limpia, al tiempo que se equilibra la necesidad de mantener un suministro de energía asequible y fiable durante la transición.

## **2.1. Gases procedentes del transporte marítimo.**

En los últimos años, el transporte marítimo se ha visto sometido a una mayor presión para reducir y, en última instancia, eliminar sus impactos ambientales negativos, especialmente en lo que respecta al cambio climático y la contaminación del aire. Hoy en día, el sector se enfrenta a una gran cantidad de desafíos, que van desde adaptarse a la pandemia mundial, navegar por una crisis económica mundial y tensiones geopolíticas, hasta la necesidad de una mayor digitalización.

Sin embargo, el problema existencial más apremiante que experimenta el sector es la necesidad de eliminar sus impactos ambientales negativos, especialmente en lo que respecta a la contaminación atmosférica. Estos impactos ambientales han colocado al transporte marítimo bajo un mayor escrutinio público. El sector se ha enfrentado a una mayor presión para reducir rápidamente su contribución al cambio climático y para reducir urgentemente sus altos niveles de contaminación del aire.

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) procedentes del transporte marítimo se estiman en alrededor de mil millones de toneladas equivalentes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub> equivalente.) Esto representa alrededor del 3% del total de las emisiones antropógenas<sup>1</sup> de GEI, una proporción bastante estable según los últimos tres estudios sobre GEI de la OMI. Estas emisiones deberán

---

<sup>1</sup> Emisiones antropógenas: Las actividades humanas generan emisiones de cuatro GEI de larga permanencia: CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y halocarbonos (gases que contienen flúor, cloro o bromo). [Consulta 12 diciembre 2021] Disponible en: <[https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto\\_invernadero#Emisiones\\_antropog%C3%A9nicas\\_de\\_gases\\_de\\_efecto\\_invernadero\\_\(GEI\)\\_de\\_larga\\_permanencia](https://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_invernadero#Emisiones_antropog%C3%A9nicas_de_gases_de_efecto_invernadero_(GEI)_de_larga_permanencia)>

reducirse al menos en un 50% de aquí a 2050, si se alcanza una trayectoria que refleje los Acuerdos de París.

Según los estudios de la Organización Marítima Internacional (OMI)<sup>2</sup> sobre los gases de efecto invernadero se estima que el transporte marítimo en total emitió 1.056 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> en el 2018, lo que representa alrededor del 2,89% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> antropógenas de ese año. [7] Según un nuevo método de asignación basado en el viaje, la parte del transporte marítimo internacional representó 740 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> en 2018.

Durante apenas seis años, desde 2013 hasta 2018, las emisiones totales de GEI del sector crecieron casi un 10 % en términos reales. Sin una acción decisiva, se prevé que estas emisiones de GEI continúen creciendo a un rango estimado del 90 % al 130 % de las emisiones del 2008 al 2050. En términos de contaminación del aire, el transporte marítimo emite el 15 % y el 13 % de todos los óxidos de azufre (SOx) y óxidos de nitrógeno (NOx) del mundo, respectivamente.

La principal fuente de emisiones de los buques son los gases de escape de sus motores de combustión, seguidos de las emisiones procedentes de la producción de combustible para buques. De estos gases de escape, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) afecta al clima, mientras que el monóxido de carbono (CO), los óxidos de azufre (SOx), los óxidos de nitrógeno (NOx), el metano (CH<sub>4</sub>) y las partículas PM<sub>2,5</sub>, incluido el carbono negro (BC), tienen tanto efectos climáticos globales como impactos medioambientales regionales y locales en la salud humana y la naturaleza.

Estas emisiones han hecho que el transporte marítimo sea considerado responsable de aproximadamente el 15 % de las muertes prematuras a nivel mundial por la contaminación del aire, o 60 000 muertes prematuras en números absolutos, en 2015.

En 2005, los buques emitieron 1,7 millones de toneladas de SO<sub>2</sub>, 2,8 millones de toneladas de NOx y alrededor de 0,2 millones de toneladas de partículas (PM<sub>2,5</sub>). Las emisiones de SO<sub>2</sub> del transporte marítimo equivalían al 20% de las emisiones de origen terrestre en la UE. Las cifras correspondientes a NOx y PM<sub>2,5</sub> fueron del 30% y del 15%. Aproximadamente el 20% de esas emisiones se produjeron en las aguas territoriales de los Estados miembros de la UE, es decir, a menos de 12 *mn* de la costa. Las emisiones de las Zonas Económicas Exclusivas (200 *mn*) representaron aproximadamente el 80% del total. Alrededor del 35% de la deposición de azufre en las zonas costeras se originó por el transporte marítimo internacional y superó los 0,2 *g/m<sup>2</sup>/año*, con valores máximos de entre 0,5 y 1,0 *g/m<sup>2</sup>/año*.

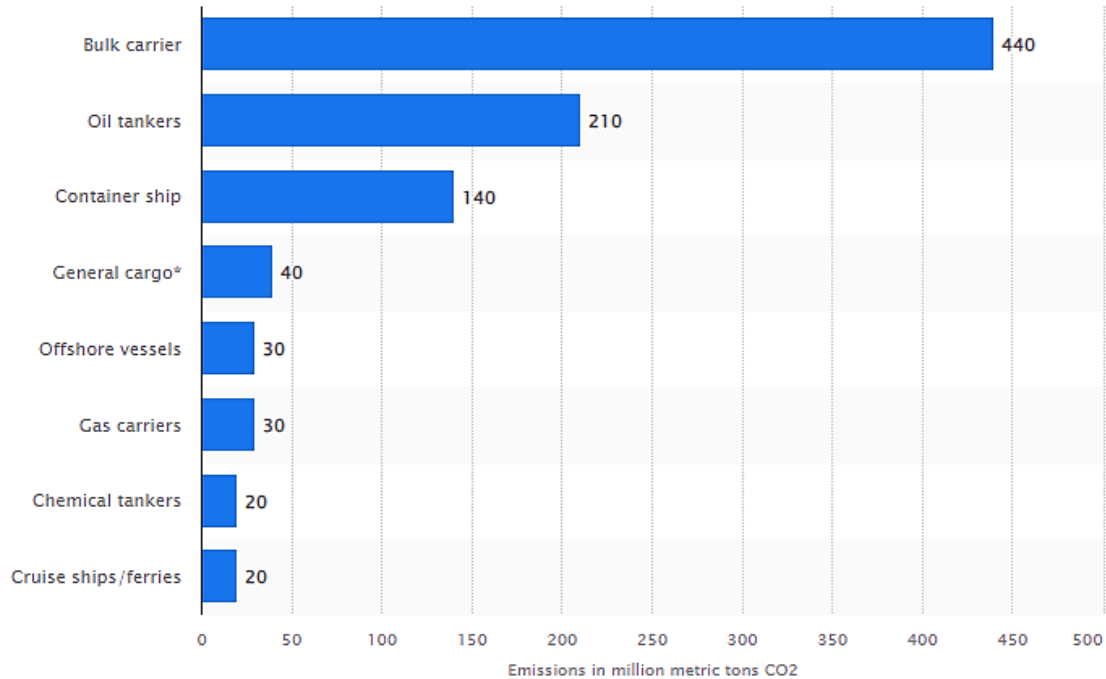
La figura 4 muestra las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte marítimo mundial según estimaciones del 2020, por tipo de barco. [8] Los graneleros emitieron en promedio 440 millones de toneladas

---

<sup>2</sup> Se refiere la sinopsis del Cuarto Estudio de la OMI sobre los GEI 2020, publicada el 23 de Marzo del 2021. Disponible en: <<https://www.imo.org/es/MediaCentre/Pages/WhatsNew-1596.aspx>>



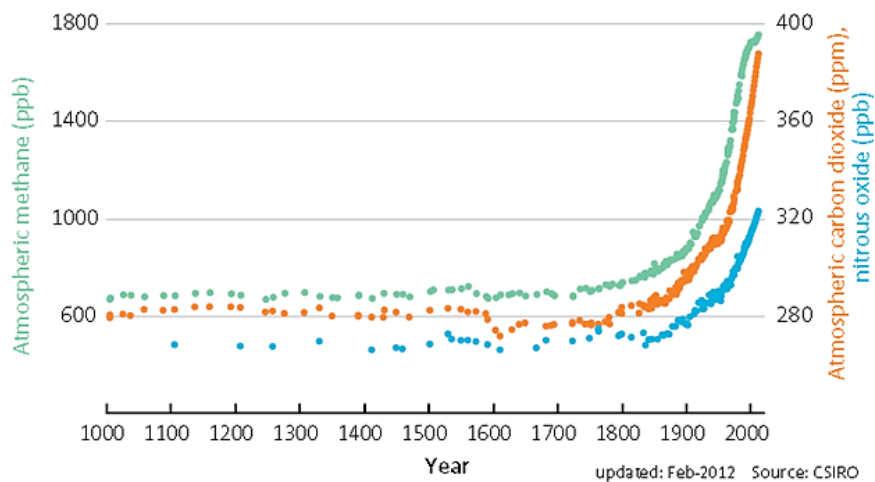
métricas de CO<sub>2</sub>, mientras que los portacontenedores emitieron 140 millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub> por año. Las cifras se refieren a buques de más de 1000 toneladas brutas, lo que representa el 99 % del tonelaje mundial.



\* Carga general incluye transporte multipropósito y otras embarcaciones no clasificadas.

**Figura 4: Emisiones de CO<sub>2</sub> en el transporte marítimo mundial en 2020, por tipo de barco (en millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub>). Fuente [8]**

El metano no quemado del motor de los barcos es una de las muchas fuentes de las crecientes emisiones mundiales de metano, donde los niveles de metano atmosférico representan un desafío importante en el esfuerzo por limitar el calentamiento global. Los niveles de concentración atmosférica de metano han aumentado drásticamente desde la revolución industrial y casi se han triplicado. En comparación, la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, que tiende a recibir la mayor atención en el debate sobre el cambio climático, ha aumentado mucho menos, es decir, en un 50% durante el mismo período. Ver la figura 5.



**Figura 5: Concentraciones de CO<sub>2</sub> en ppm (naranja), de CH<sub>4</sub> en ppb (verde) y N<sub>2</sub>O en ppb (azul) durante los últimos 1000 años. Basadas en mediciones de aire atrapado en hielo y firn antárticos y el registro moderno de Cape Grim. Fuente CSIRO [9]**

## 2.2. Aspectos que influyen en las emisiones de los buques.

Para analizar las emisiones de los buques es importante comprender las características claves que influyen directamente en sus emisiones de CO<sub>2</sub>.

Al definir el escenario de análisis que nos permita evaluar el impacto de los aspectos técnicos y no técnicos en las emisiones de contaminantes atmosféricos procedentes de los buques en los mares europeos y su distribución espacial, debemos tener en cuenta aquellas zonas marinas especialmente sensibles que requieren protección especial por su importancia ecológica, socioeconómica o científica reconocidas, o que puede ser vulnerables a los daños resultantes de las actividades marítimas internacionales. El escenario está formado por las zonas existentes en el Báltico y el Mar del Norte, el Mar Atlántico, el Mar Céltico, el Golfo de Vizcaya, el Mar Mediterráneo y el Mar Negro, a lo largo de la línea costera de los países de la Unión Europea. [10] Ver figura 6.

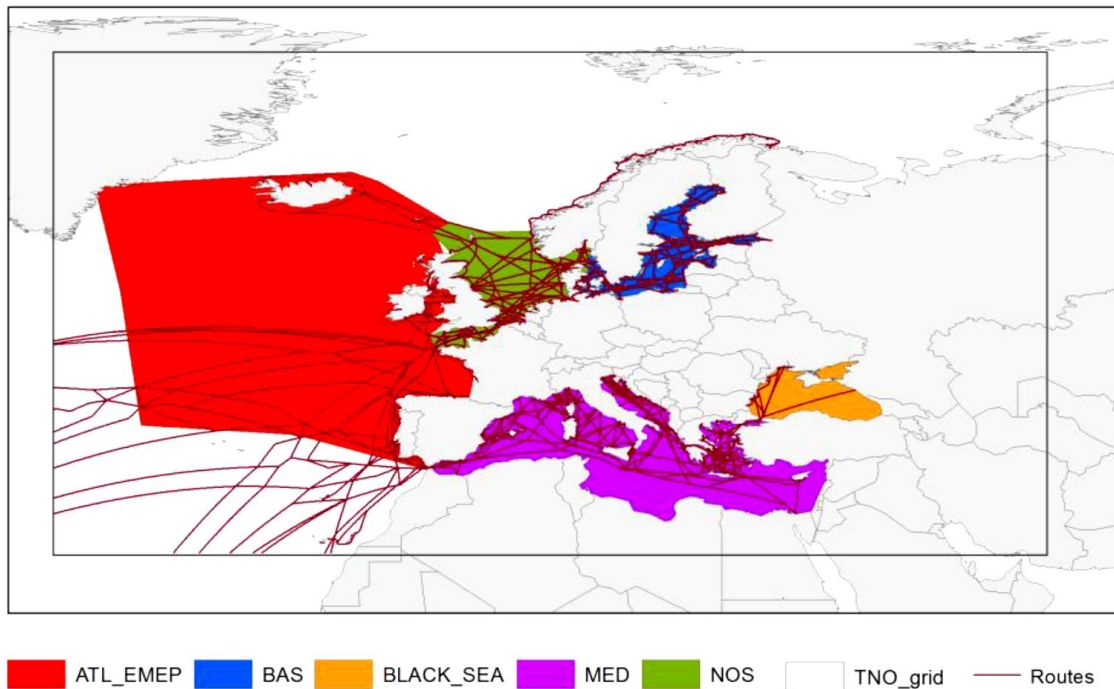


Figura 6: Rutas marítimas y mares regionales. Fuente [10]

Las emisiones del transporte marítimo a nivel internacional no sólo dependen del tráfico total, sino de las características de la flota: tipo, tamaño, edad, combustible y motores. Además, es necesario tener en cuenta los aspectos operacionales, tales como:

- La capacidad técnica del buque (potencia, consumo de combustible, revestimiento del casco, limpieza, incrustaciones en el casco y en la hélice),
- Las condiciones ambientales durante el viaje, es decir, las condiciones climáticas preponderantes (fuerza y dirección del viento, presión, estado de la mar, dirección, período),
- La velocidad contractual (promedio de revoluciones por minuto),
- El calado con el que opera el buque, y para algunos buques como los buques tanques la proporción entre los viajes con carga y los viajes en lastre (volumen de carga).

Todos estos factores representan variables a la hora de evaluar la actividad compleja de un buque durante un viaje para determinar las emisiones totales, siendo los de mayor importancia el factor velocidad y el trabajo de transporte (total de millas marinas por toneladas de trabajo de carga embarcada realizadas por los buques y la utilización de la carga útil)

Los motores a bordo de los buques se encuentran entre los mayores tipos de motores del mundo, su tamaño y sus características influyen directamente en el consumo de combustible y a su vez en las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los buques suelen contener varios motores para diferentes fines. El motor principal enciende la hélice del buque y la mueve a través del agua, mientras que los motores auxiliares tienen como objetivo alimentar los sistemas eléctricos del buque y una serie de otros

elementos de la maquinaria que proporcionan servicios esenciales adicionales como la inserción de gas, la producción de calor y vapor y la incineración.

De los informes de emisiones de las navieras<sup>3</sup> se han detectado más de 180.000 fuentes de emisiones a bordo de sus buques, siendo las principales:

- Motores principales (20%);
- Motores auxiliares (50%);
- Calderas (20%);
- Generadores de gas inerte (2%).

A continuación analizaremos 5 variables claves que determinan el nivel de emisiones de los buques.

### **1. La velocidad de los buques.**

La velocidad, como habíamos mencionado anteriormente, es un indicador operativo clave, ya que tiene un efecto directo sobre el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub>. La relación entre velocidad y las emisiones suele ser exponencial. Una reducción de la velocidad del 10% puede conducir a una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> de alrededor del 20%.[11] Siguiendo este principio, varios operadores de buques han adoptado en la última década enfoques de vapor lento con el fin de reducir sus costes de explotación, aumentar sus beneficios y optimizar la utilización de su flota. Las estrategias de reducción de la velocidad pueden ahorrar energía y combustible en toda la flota, incluso cuando se necesitan buques adicionales para mantener el servicio. La velocidad es un parámetro difícil de comparar entre diferentes tipos de buques, ya que refleja diferentes diseños de buques y modelos de negocio. Sin embargo, la evolución de la velocidad a lo largo del tiempo es un indicador importante para explicar las variaciones en la eficiencia energética operativa de los buques.

### **2. Emisiones de CO<sub>2</sub> por el consumo de combustible.**

El consumo de combustible también está directamente relacionado con las emisiones de CO<sub>2</sub> y es otro de los indicadores claves reportados por la normativa del MRV de la UE.

En mayo de 2020, la Comisión del Sistema de Seguimiento, Notificación y Verificación de la Unión Europea (EU Monitoring, Reporting and Verification System) publicó el primer informe anual sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte marítimo, basado en datos sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> de más de 11 600 buques que faenaban en el 2018 y segundo informe en el 2019 con datos y resultados muy similares. [11] [12] Los datos comunicados cubren alrededor del 90% de las emisiones de CO<sub>2</sub>,

---

<sup>3</sup> El Reglamento de Seguimiento, Notificación y Verificación de la UE define a las empresas navieras como el armador o cualquier otra organización o persona que haya asumido la responsabilidad de la explotación del buque [11]

pero sólo alrededor del 55% de todos los buques que hacen escala en puertos del Espacio Económico Europeo, ya que no se incluyen los buques de menos de 5000 toneladas brutas.

La flota monitoreada por el sistema MRV de la UE consumió en total más de 44 millones de toneladas de combustible en 2018, en comparación con la demanda total de petróleo de la UE que ascendió a 635,8 millones de toneladas en 2018, ver la figura 7.

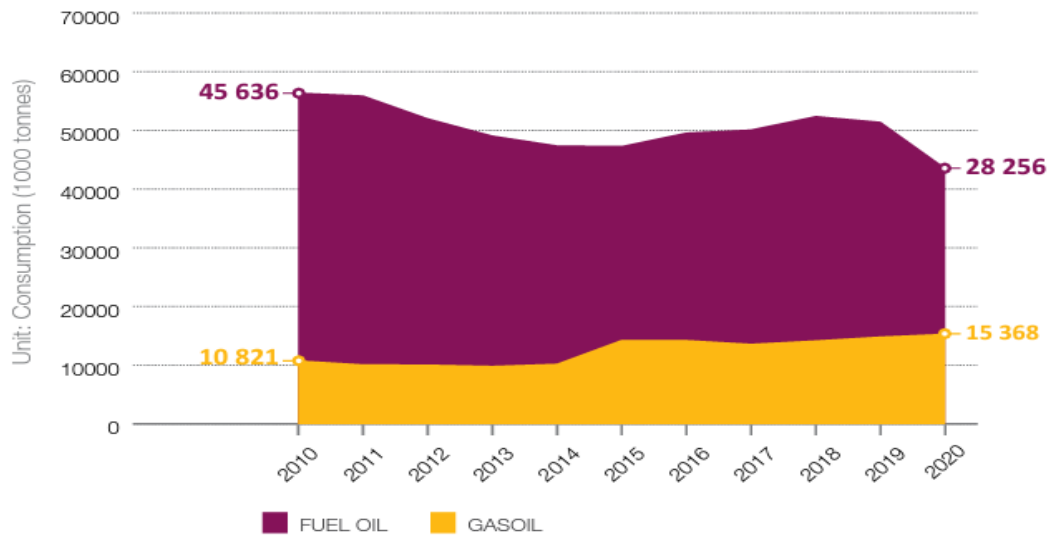


Figura 7: Consumo de combustible marino en la UE (2020). Fuente Wood Mackenzie<sup>4</sup>.

En términos absolutos, los buques portacontenedores consumieron más combustible, con 14 millones de toneladas, seguidos de los graneleros y los petroleros, con alrededor de 5,6 millones de toneladas cada uno. En conjunto, estos tres tipos de buques representan cerca del 60% del consumo total de combustible notificado en el sistema MRV de la UE. Los valores de consumo de combustible y la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas según tipo de buque de la flota analizada en el Sistema MRV de la UE se pueden observar en la Tabla 1, elaborada a partir de los datos reportados en la base de datos THETIS-MRV de la UE.

<sup>4</sup> En los últimos años se ha producido un aumento del consumo de gasóleo marino a expensas del fuel-oil. Cambiar a GNL o utilizar depuradoras son alternativas a cumplir con los nuevos límites de emisiones de la Organización Marítima Internacional (OMI). Fuels Europe (2020). FIG.23: Marine Fuel Consumption in the EU-27. Available at: [https://www.fuelseurope.eu/wp-content/uploads/SR\\_FuelsEurope-\\_2021\\_-23.pdf](https://www.fuelseurope.eu/wp-content/uploads/SR_FuelsEurope-_2021_-23.pdf)

Ship Type	Total fuel consumption (tonnes)	Total CO <sub>2</sub> emissions (tonnes)
Bulk Carrier	5 689 137.6	17 862 023.4
Chemical Tanker	2 903 467.5	9 138 664.0
Container Ship	14 107 224.4	44 090 091.0
General Cargo Ship	1 882 215.4	5 907 094.5
Oil Tanker	5 652 346.0	17 782 032.8
Combination carrier	26 892.0	84 088.0
Gas carrier	792 534.6	2 452 061.0
LNG carrier	1 903 895.0	5 467 346.0
Other ship types	329 854.7	1 033 029.0
Passenger ship	2 026 514.0	6 367 662.0
Refrigerated cargo carrier	570 700.0	1 782 187.0
Ro-pax ship	4 344 727.0	13 600 000.0
Ro-ro ship	1 916 224.0	6 046 936.0
Vehicle carrier	1 608 581.0	5 041 300.0
Container/ro-ro cargo ship	514 422.2	1 611 117.0
<b>Total</b>	<b>44 268 735.2</b>	<b>138 265 631.8</b>

**Tabla 1: Total de emisiones de CO<sub>2</sub> y consumo de combustible por tipo de buques. Fuente: Datos THETIS MRV UE (2022)**

En total, las 138 millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> se originaron en 11.653 buques que quemaron combustibles fósiles para realizar más de 400.000 viajes, recorrieron 323 millones de millas náuticas (1.500 veces la distancia entre la Tierra y la Luna) y transportaron la gran mayoría del comercio exterior de mercancías de la UE. Estas emisiones de CO<sub>2</sub> representan más del 3,7% de todas las emisiones de CO<sub>2</sub> notificadas por la Unión Europea en el 2018. Las emisiones de CO<sub>2</sub> se estimaron sobre la base del consumo de combustible de cada buque y de factores de emisión específicos definidos para cada tipo de combustible.

El consumo de combustible varía. Cabe señalar que los buques portacontenedores reportaron más del doble del consumo de combustible declarado por los graneleros, a pesar de haber pasado menos tiempo total en el mar y de haber recorrido sólo un 28% más de distancia. Se debe a que los buques portacontenedores suelen tener motores más potentes que los graneleros y operan a velocidades mucho mayores (40% más rápidas que los graneleros). La menor cantidad de

combustible que consumen los graneleros puede explicarse principalmente por su baja velocidad de crucero.

Otros tipos de combustibles como el Gas-oil se utilizan generalmente para motores auxiliares y calderas, o durante el funcionamiento de un buque en zonas de control de emisiones. El gas natural licuado LNG fue utilizado principalmente por transportistas de LNG y Gas.

A escala mundial, las 138 millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> notificadas en el sistema MRV de la UE representan alrededor del 15% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> del transporte marítimo internacional y nacional, estimadas en unos 890 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> en 2015. Aunque al mismo tiempo, la UE representó el 17% de las exportaciones marítimas mundiales y el 20% de las importaciones marítimas mundiales.

### **3. Emisiones de CO<sub>2</sub> según el tipo de viaje.**

Si lo analizamos por el tipo de viaje, alrededor del 60% de las emisiones de CO<sub>2</sub> notificadas por la flota monitoreada proceden de viajes hacia o desde un puerto situado fuera del Espacio Económico Europeo. Estos viajes de entrada o de salida son, por lo tanto, responsables de la mayor parte de las emisiones. Las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de los viajes internacionales de entrada son ligeramente superiores a las emisiones procedentes de los viajes de salida, teniendo en cuenta que los productos líquidos a granel, como el petróleo crudo y los productos petrolíferos, constituyen una parte importante del tonelaje de entrada. [11][12]

Los viajes entre puertos del Espacio Económico Europeo son responsables de alrededor del 32% de las emisiones de CO<sub>2</sub> notificadas, es decir, 46 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>.

Los buques también emiten CO<sub>2</sub> cuando están amarrados de forma segura en puerto, ya que la mayoría de los buques producen su propia electricidad a bordo para prestar servicios a los pasajeros y a la tripulación, como aire acondicionado, refrigerar mercancías perecederas o utilizar maquinaria para cargar o descargar mercancías. Según el sistema MRV de la UE, las emisiones en los puertos representan alrededor del 7% de todas las emisiones de CO<sub>2</sub> notificadas, y alrededor de 10 millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> en términos absolutos.

### **4. Emisiones de CO<sub>2</sub> por el tipo de buque.**

Los tipos de buques que más emisiones de CO<sub>2</sub> emiten son también los mayores consumidores de combustible. Como se muestra en la figura 8, los buques portacontenedores representaron la mayor proporción de las emisiones totales, con más del 30%.

En conjunto, las emisiones de CO<sub>2</sub> de los petroleros y los buques quimiqueros representan alrededor del 20% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub>, mientras que transportan más de un tercio de la carga transportada en los principales puertos de la UE.

Treinta y seis buques Ro-Ro y Ro-Pax notificaron alrededor de 20 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>. Estas emisiones están relacionadas principalmente con los servicios nacionales o intracomunitarios de transbordadores que se concentran en el Báltico, el Mar del Norte y el Mediterráneo. Se calcula que más de 415 millones de pasajeros embarcan y desembarcan en los puertos de la UE cada año.

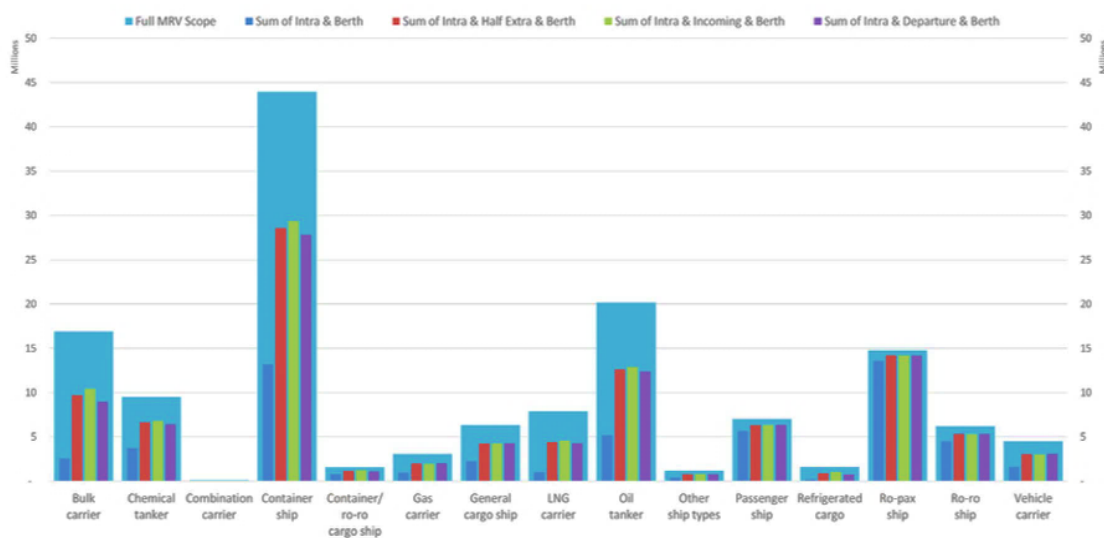


Figura 8: Emisiones de CO<sub>2</sub> por tipo de viaje y tipo de buque (basadas en datos del 2019). Fuente [12]

### 5. Emisiones de CO<sub>2</sub> por la edad de los buques.

Alrededor del 74% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> proceden de buques construidos antes de 2013. De toda la flota supervisada, 8.840 buques entran en esta categoría. Los buques más antiguos tienen el nivel medio más elevado de emisiones de CO<sub>2</sub> por buque, mientras que los buques más jóvenes construidos después de 2013 emiten menos de la media.

El 22% de las emisiones totales proceden de buques de menos de 5 años. Dependiendo de su vida útil, que a su vez depende del tipo de buque, estos buques podrían seguir utilizándose en 2040, incluso hasta el 2050. Por lo tanto, los instrumentos políticos para reducir las emisiones del transporte marítimo deberían centrarse en todas las edades, ya que existe una diferencia de edad para todos los tipos de buques.

El cambio climático constituye una emergencia mundial que va más allá de las fronteras nacionales. Se trata de un problema que exige soluciones coordinadas en todos los niveles y cooperación internacional para ayudar a los países a avanzar hacia una economía con bajas emisiones de carbono.

Estudios sobre las medidas de reducción de las emisiones en el transporte marítimo han demostrado que es posible mejorar la eficiencia energética y reducir las emisiones de manera rentable, mediante la investigación y el desarrollo industrial relacionados con la eficiencia del combustible, la reducción de las emisiones de GEI y las políticas de control de las emisiones atmosféricas.



## 2.3. Conclusiones del Capítulo 2.

- *La transformación global que sería necesaria para limitar el calentamiento a 1,5°C requiere condiciones favorables que reflejen los vínculos, las sinergias y las compensaciones entre la mitigación, la adaptación y el desarrollo sostenible.*
- *Las emisiones de carbono de las actividades humanas ha sido la causa principal del calentamiento de los océanos, la acidificación y la pérdida de oxígeno.*
- *El aumento de la temperatura hasta la fecha ya ha provocado profundas alteraciones en los sistemas humanos y naturales, incluido el aumento de las sequías, las inundaciones y algunos otros tipos de condiciones meteorológicas extremas, aumento del nivel del mar y pérdida de biodiversidad.*
- *Si continúa la tasa de calentamiento actual, el mundo alcanzaría un calentamiento global inducido por el hombre de 1,5°C alrededor de 2040.*
- *Para limitar el calentamiento global las emisiones deben reducirse aproximadamente a la mitad para el 2030 para un futuro de 1,5°C.*
- *Se estima que el transporte marítimo en total emitió 1.056 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> en el 2018, lo que representa alrededor del 2,89% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> antropógenas de ese año.*
- *Según estimaciones del 2020, los graneleros emitieron en promedio 440, los petroleros 210, mientras que los portacontenedores emitieron 140 millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub> por año. Las cifras se refieren a buques de más de 1000 toneladas brutas, lo que representa el 99% del tonelaje mundial.*
- *En el año 2020 se consumieron un total de 44 268 735.2 ton de combustible y se emitieron 138 265 631.8 ton de CO<sub>2</sub> según reportes del THETIS MRV UE (2022)*
- *El metano no quemado del motor de los barcos es una de las fuentes de las crecientes emisiones mundiales de metano.*
- *Las principales fuentes de emisiones a bordo de los buques son: motores auxiliares, motores principales, calderas y generadores de gas inerte.*
- *Las variables claves que determinan el nivel de emisiones de los buques son: la velocidad de los buques; el consumo de combustible; el tipo de viaje; el tipo de buque, y la edad de los buques, analizado desde un escenario definido por las rutas marítimas y mares a lo largo de la línea costera de los países de la Unión Europea.*
- *El mundo necesita una transición más rápida hacia un sistema energético profundamente descarbonizado, reduciendo sustancialmente las emisiones año tras año. Esto requerirá un cambio de mentalidad, revoluciones tecnológicas y de comportamiento, innovación, políticas con visión de futuro y grandes inversiones.*

## Capítol 3. Marco Normativo.

El punto de partida para mitigar el aumento de las emisiones surgió en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) con el objetivo de estabilizar los gases de efecto invernadero en la atmósfera, y el Protocolo de Kioto para CMNUCC (1997), que desde ese momento fue la principal iniciativa en la lucha contra del cambio climático y en donde se planteó que las partes debían limitar o reducir las emisiones de gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal generadas por los combustibles del transporte aéreo y marítimo internacional trabajando por conducto de la Organización de Aviación Civil Internacional y la Organización Marítima Internacional, respectivamente. El protocolo de Kioto estableció los primeros objetivos jurídicamente vinculantes de reducción de emisiones para los países desarrollados. Este protocolo expiró en el 2020.

Mediante el Acuerdo de París los países renovaron su compromiso con la acción por el clima y alcanzaron un acuerdo sobre nuevos objetivos para acelerar los esfuerzos destinados a limitar el calentamiento global.

En este contexto, la Organización Marítima Internacional (OMI) es responsable de la regulación global relativa a todos los aspectos del transporte marítimo. Es un organismo especializado de las Naciones Unidas que establece las normas para la seguridad y la protección del medio ambiente del sector marítimo internacional. La misión de la OMI es promover el transporte marítimo seguro, protegido, ambientalmente racional, eficiente y sostenible a través de la cooperación.

La OMI introdujo una serie de medidas destinadas a prevenir accidentes de petroleros y minimizar sus consecuencias. También abordó la amenaza ambiental causada por las operaciones a bordo. La más importante de todas estas medidas fue el Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973, modificado por el Protocolo de 1978 relativo al mismo (MARPOL 73/78). Abarca no solo la contaminación por hidrocarburos accidental y operativa, sino también la contaminación por productos químicos, mercancías envasadas, aguas residuales, basura y contaminación del aire.

Dentro de los cinco comités principales que componen la Organización, el Comité de Protección del Medio Marino (MEPC), está integrado por todos los Estados Miembros y además facultado para examinar toda cuestión que sea competencia de la organización en relación con la prevención y contención de la contaminación del mar, ocasionada por los buques.

La financiación del clima es necesaria para la mitigación, ya que se requieren inversiones a gran escala para reducir significativamente las emisiones. La financiación de la lucha contra el cambio climático es igualmente significativa para la adaptación, ya que se necesitan importantes recursos financieros para adaptarse a los efectos adversos y reducir los efectos de un clima cambiante. Once de los principales bancos internacionales con operaciones en el sector naviero alcanzaron

recientemente un acuerdo, bautizado como los 'Principios de Poseidón', para reducir en un 50 % las emisiones contaminantes antes de 2050, en línea con las nuevas estrategias de la OMI.

### 3.1. Acuerdo de París.

El Acuerdo de París es un tratado internacional de la ONU sobre el cambio climático jurídicamente vinculante en el marco de la CMNUCC. Fue adoptado por 196 Partes en la COP21<sup>5</sup> en París, el 12 de diciembre de 2015 y entró en vigor el 4 de noviembre de 2016. [13] [14]

El Acuerdo de París posee tres elementos claves:

1. Limitar el aumento de las temperaturas a 1,5°C;
2. Examinar la contribución de los países a la reducción de las emisiones cada 5 años;
3. Ayudar a las naciones más pobres proporcionando financiación climática.

El Acuerdo tiene por objeto fortalecer la respuesta mundial frente a la amenaza del cambio climático, limitando el aumento de la temperatura mundial "muy por debajo de 2°C respecto de los niveles preindustriales" y "proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5°C con respecto a los niveles preindustriales".. Para alcanzar este objetivo de temperatura a largo plazo, los países se proponen alcanzar el máximo de las emisiones de gases de efecto invernadero lo antes posible y lograr un planeta con clima neutro a mediados de siglo.

En el 2020, los países presentaron sus planes de acción climática conocidos como contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC), donde se comunican las medidas que tomarán para reducir sus emisiones de GEI para alcanzar el objetivo del Acuerdo de París, así como las acciones que tomarán para crear resiliencia y adaptarse a los efectos del aumento de las temperaturas. [13][14]

En el Acuerdo se reafirma que los países desarrollados deben tomar la iniciativa en la prestación de asistencia financiera a los países menos dotados y más vulnerables, al tiempo que se alienta por primera vez a las demás Partes a aportar contribuciones voluntarias.

Se establece un marco tecnológico para proporcionar una orientación general al Mecanismo Tecnológico. El mecanismo está acelerando el desarrollo y la transferencia de tecnología a través de sus subdivisiones de política y aplicación. [14]

No todos los países en desarrollo tienen capacidad suficiente para hacer frente a muchos de los desafíos que plantea el cambio climático. El Acuerdo hace gran hincapié en el fomento de la capacidad relacionada con el clima en los países en desarrollo, y se pide a todos los países

---

<sup>5</sup> La Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático 2015, o 21ª Conferencia de las Partes (COP21), se celebró en París, Francia, desde el 30 de noviembre hasta el 11 de diciembre del 2015, con el objetivo, por primera vez en más de 20 años de negociaciones de la ONU, lograr un acuerdo universal y legalmente vinculante sobre el clima, con el fin de mantener el calentamiento global por debajo de los 2°C.

desarrollados que aumenten su apoyo a las medidas de fomento de la capacidad para aquellos países menos adelantados.

Para supervisar el progreso, los países establecieron un marco de transparencia mejorado. En virtud de esto, los países informarán de manera transparente sobre las medidas adoptadas y los progresos realizados en la mitigación del cambio climático, las medidas de adaptación y el apoyo prestado o recibido.[14] También se prevén procedimientos internacionales para el examen de los informes presentados. La información reunida se incorporará al balance mundial de la situación, que evaluará el progreso colectivo hacia los objetivos climáticos a largo plazo. Esto dará lugar a recomendaciones para que los países establezcan planes más ambiciosos en la próxima ronda.

El Acuerdo de París es un hito en el proceso multilateral del cambio climático porque, por primera vez, un acuerdo vinculante hace que todos los países se unan en una causa común para emprender esfuerzos ambiciosos para combatir el cambio climático y adaptarse a sus efectos.

Aunque es necesario aumentar las medidas relativas al cambio climático para alcanzar los objetivos del Acuerdo de París, los años transcurridos desde su entrada en vigor ya han dado lugar a soluciones con bajas emisiones de carbono y a nuevos mercados. Cada vez más países, regiones, ciudades y empresas están estableciendo objetivos de neutralidad de carbono. Las soluciones de cero emisiones se están volviendo competitivas en todos los sectores económicos. Esta tendencia es más notoria en los sectores de la energía y el transporte, y ha creado muchas nuevas oportunidades de negocio para los que se adelantan.

## **3.2. Prevención de la Contaminación Atmosférica ocasionada por los buques. Anexo VI del Convenio Marpol.**

El Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, (MARPOL) es el principal convenio internacional que versa sobre la prevención de la contaminación del medio marino por los buques a causa de factores de funcionamiento o accidentales.

En el Convenio figuran reglas encaminadas a prevenir y reducir al mínimo la contaminación ocasionada por los buques, tanto accidental como procedente de las operaciones normales, y actualmente incluye seis anexos técnicos. En la mayoría de tales anexos figuran zonas especiales en las que se realizan controles estrictos respecto de las descargas operacionales.

En el *Anexo VI: Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques*, (entrada en vigor: 19 de mayo de 2005), se establecen los límites de las emisiones de óxidos de azufre y de óxidos de nitrógeno de los escapes de los buques y se prohíben las emisiones deliberadas de sustancias que agotan el ozono; para las zonas de control de emisiones designadas se establecen normas más estrictas en relación con la emisión de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y de materias particuladas, se regula la incineración a bordo, así como las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) procedentes de los buques tanque. Adicionalmente, se establecen medidas técnicas

y operacionales obligatorias de eficiencia energética encaminadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los buques.

A continuación analizaremos algunas de estas reglas tomando como referencia la edición refundida 2017 del Convenio MARPOL. [15]

*Regla 1: Ámbito de aplicación a todos los buques, con las excepciones mencionadas en la Regla 3.*

*Regla 12: Sustancias que agotan la capa de ozono: se prohíbe toda emisión deliberada de sustancias que agotan la capa de ozono. Las emisiones deliberadas incluyen las que se producen durante el mantenimiento, la revisión, la reparación o la eliminación de sistemas o equipos, pero no la liberación de cantidades mínimas durante la recuperación o el reciclaje de una sustancia que agota la capa de ozono. [...]*

*Regla 13: Óxidos de Nitrógeno (NOx).*

El control de las emisiones de NOx de los motores diésel se lleva a cabo mediante el cumplimiento de las prescripciones de reconocimiento y certificación que conducen a la expedición del Certificado Internacional de prevención de la contaminación atmosférica para motores (EIAPP) y a la posterior demostración de cumplimiento durante el servicio, de acuerdo con las prescripciones obligatorias.

Las prescripciones sobre el control de las emisiones de NOx se aplican a los motores diésel marinos instalados de potencia de salida superior a 130 kW distintos de los utilizados exclusivamente para casos de emergencia, independientemente del arqueo del buque en el que se instalen estos motores. Se aplican diferentes niveles de control según la fecha de construcción del buque, y según un determinado nivel (Tabla 2), cuyo valor límite máximo se determina a partir del régimen nominal del motor:

Nivel	Fecha de construcción del buque	Valor límite de emisiones ponderada total del ciclo (g/kWh) n= régimen nominal del motor (rpm)		
		n < 130	n = 130 – 2000	n ≥ 2000
I	1 enero 2000	17,0	$45 \cdot n^{(-0.2)}$ , por ejemplo, 720 rpm – 12,1	9,8
II	1 enero 2011	14,4	$44 \cdot n^{(-0.23)}$ por ejemplo, 720 rpm – 9,7	7,7
III	1 enero 2016	3,4	$9 \cdot n^{(-0.2)}$ por ejemplo, 720 rpm – 2,4	2,0

**Tabla 2: Valores límites de emisiones de NOx aplicados a motores marinos diésel.**

Los controles de Nivel III sólo se aplican a buques específicos mientras navegan en las zonas de control de las emisiones (ECA) establecidas para limitar las emisiones de NOx; fuera de dichas zonas se aplican controles de Nivel II.

*Regla 14: Óxidos de azufre (SOx) y materia particulada.*

Los controles de las emisiones de SOx y de materia particulada se aplican a los equipos y los dispositivos de combustión de todo tipo de fueloil, según la definición que figura en la Regla 2.9,

instalados a bordo y, por tanto, incluyen tanto a los motores principales como a los auxiliares, así como a elementos tales como calderas y generadores de gas inerte. Estos controles se dividen entre los que se aplican en las Zonas de Control de las Emisiones (ECA) establecidas para limitar las emisiones de SO<sub>x</sub> y de materia particulada y los controles que se aplican fuera de esas zonas y que se consiguen poner en práctica principalmente mediante la limitación del contenido máximo de azufre del fueloil cargado, transportado y posteriormente consumido a bordo. Estos límites de contenido de azufre en el fueloil (expresados en % *masa/masa*, vale decir, en peso) están sujetos a una serie de cambios por etapas a lo largo de los años, según lo dispuesto en las *Reglas 14.1 y 14.4*:

Fuera de una ECA establecida para limitar las emisiones de SO<sub>x</sub> y de materia particulada:

- 4,50% masa/masa antes del 1 de enero de 2012.
- 3,50% masa/masa a partir del 1 de enero de 2012.
- 0,50% masa/masa a partir del 1 de enero de 2020.

En una ECA establecida para limitar las emisiones de SO<sub>x</sub> y de materia particulada.

- 1,50% masa/masa antes del 1 de julio de 2010.
- 1,00% masa/masa a partir del 1 de julio de 2010.
- 0,10% masa/masa a partir del 1 de enero de 2015.

A efectos de esta regla se entiende por zonas ECA:

1. Zona del mar Báltico – definida en el Anexo I del Convenio MARPOL (solamente para los SO<sub>x</sub>);
2. Zona del Mar del Norte –definida en el Anexo V del Convenio MARPOL (solamente para los SO<sub>x</sub>);
3. Zona de Norteamérica – definida en el apéndice VII del Anexo VI del Convenio MARPOL (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y PM);
4. Zona del mar Caribe de los Estados Unidos – definida en el Apéndice VII del Anexo VI del Convenio MARPOL (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y PM)

La mayoría de los buques que navegan tanto fuera como dentro de estas ECA utilizarán, por lo tanto, diferentes tipos de fueloil para así cumplir los límites respectivos. En estos casos, antes de entrar en una ECA, se deberá haber cambiado totalmente el fueloil para así utilizar el fueloil reglamentario que corresponda a la ECA en cuestión.

#### *Regla 15: Compuestos orgánicos volátiles (COV)*

Esta regla sólo se aplica a los buques tanque. No obstante, se aplicará también a los gaseros cuando los sistemas de embarque y contención de la carga sean de un tipo que permita la retención sin riesgos a bordo de los COV que no contengan metano o el retorno sin riesgo de éstos a la tierra. En esta regla se abordan dos aspectos de control de los COV:

1. El control de los COV emitidos a la atmósfera cuando se trata de determinados puertos o terminales se lleva a cabo mediante la observancia de la obligación de emplear sistemas de control de las emisiones de vapores.

2. Todo buque tanque que transporte petróleo crudo dispondrá a bordo de un plan de gestión de los COV, aprobado y específico para cada buque, que deberá implantarse de manera eficaz, como mínimo, en relación con las cuestiones enumeradas en la regla.

*Regla 18: Disponibilidad y calidad del fueloil.*

En general esta norma no está dirigida a los buques, sino a los proveedores de fueloil y su control por parte de las autoridades correspondientes junto con otros aspectos normativos. Plantea acciones relacionadas con la retención a bordo de las notas de entrega de combustible, las directrices para el muestreo de fueloil, además de las cláusulas de disponibilidad y control local del fueloil.

*Regla 18.3: El fueloil para combustible que se entregue y se utilice a bordo de los buques [...]; estará compuesto por mezclas de hidrocarburos derivados del refinado del petróleo [...]; no contendrá ningún ácido inorgánico, y no contendrá ninguna sustancia añadida ni desecho químico que: comprometa la seguridad de los buques o afecte el rendimiento de las máquinas, o sea perjudicial para el personal, o contribuya a aumentar la contaminación atmosférica. [...]*

*Reglas sobre la eficiencia energética de los buques.*

Mediante las enmiendas al Anexo VI del Convenio se añadió un nuevo Capítulo 4 que incluye las reglas sobre la eficiencia energética de los buques. En la resolución *MEPC. 203 (62)* (julio de 2011) el índice de eficiencia energética de proyecto (EEDI) pasó a ser obligatorio para los buques nuevos, y el Plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP) para todos los buques. Éste fue el primer instrumento sobre el cambio climático, jurídicamente vinculante, que se adoptó desde la adopción del Protocolo de Kyoto. Por ser unas de las medidas técnicas más importantes, a estas reglas le dedicaremos un análisis más detallado en capítulos posteriores.

Se espera que estas regulaciones produzcan un notable beneficio para el medio atmosférico y la salud humana, especialmente para aquellas personas que viven en ciudades portuarias y comunidades costeras.

### **3.3. La OMI y su estrategia para la descarbonización del transporte marítimo.**

En la última década, la OMI ha emprendido nuevas acciones, incluyendo nuevas medidas reguladoras y la adopción de la Estrategia Inicial de la OMI sobre los gases de efecto invernadero (GEI). Para apoyar su implementación, ha estado ejecutando un amplio programa de desarrollo de capacidades y asistencia técnica, que incluye una serie de proyectos mundiales, especialmente entre los países en desarrollo, los pequeños estados insulares en desarrollo y a los menos adelantados, con vistas a implantar y apoyar la eficiencia energética del sector.

Entre estos proyectos se incluyen los siguientes:

- La Alianza mundial del sector para apoyar al sector marítimo de bajo carbono (GIA), (2017), para identificar y desarrollar soluciones en la adopción de tecnologías y operaciones de eficiencia energética.
- El proyecto Global MTCC Network (GMN), (2018), que desarrolla una red mundial de centros de cooperación en tecnología marítima.
- El proyecto GreenVoyage-2050,(2019), conjuntamente con el gobierno de Noruega, de intercambio de conocimientos, información y soluciones técnicas para reducir las emisiones.
- El fondo fiduciario voluntario de donantes múltiples para apoyar la implantación de la estrategia de la OMI de reducción de las emisiones de GEI.
- La cooperación con los puertos, incluyendo medidas regulatorias, técnicas, operativas y económicas.

### **3.3.1. Comité de Protección del Medio Marino.**

La OMI es una organización técnica cuyo trabajo lo realizan varios comités y subcomités. Uno de ellos es el Comité de Protección del Medio Marino, establecido por la Asamblea en noviembre de 1973, que se encarga de coordinar las actividades de la Organización encaminadas a la prevención y contención de la contaminación. Uno de los mayores logros del MEPC ha sido aprobar y desarrollar el Convenio MARPOL, el principal instrumento a nivel mundial para la prevención de la contaminación desde los buques.

El Comité de Protección del Medio Marino (MEPC) se encarga especialmente de la aprobación y enmienda de convenios y otras reglas y medidas para garantizar su observancia.

### **3.4. Medidas adoptadas para reducir las emisiones de GEI procedentes del transporte marítimo. Fases de Implantación.**

En octubre de 2018, la OMI adoptó la Estrategia Inicial de la OMI para reducir las emisiones de GEI procedentes del transporte marítimo internacional y de eliminarlos tan pronto como sea posible durante este siglo. Para la implantación de esta estrategia se aprobó un programa de medidas de seguimiento, destinado a ser utilizado como una herramienta de planificación para cumplir con los plazos identificados en la Estrategia Inicial.

La Estrategia Inicial concibe, en particular, reducir la intensidad del carbono del transporte marítimo internacional (es decir, reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> por trabajo de transporte, como promedio para todo el transporte marítimo internacional, en al menos un 40 % de aquí a 2030 comparado con los niveles de 2008, y proseguir los esfuerzos hacia el 70 % de aquí a 2050 comparado con los niveles de 2008) y reducir el total de las emisiones de GEI anuales en al menos un 50% de aquí a 2050 comparado con los niveles de 2008.



Esta Estrategia Inicial actúa como marco de trabajo para los Estados Miembros, definiendo la futura visión para el transporte marítimo internacional, los niveles de ambición para reducir las emisiones de efecto invernadero y los principios rectores. La estrategia también identifica barreras y medidas de apoyo como la creación de capacidad, la cooperación técnica, la investigación y el desarrollo.

Los niveles de ambición que guían la Estrategia Inicial se describen en el siguiente Cuadro:

- 1. La intensidad del carbono de los buques disminuirá mediante la implantación de fases adicionales del índice de eficiencia energética de proyecto (EEDI) para los buques nuevos;*

Examinar, con el propósito de reforzarlas, las prescripciones de proyecto de eficiencia energética para los buques determinando el porcentaje de mejora de cada fase para cada tipo de buque, según proceda.

- 2. La intensidad del carbono del transporte marítimo internacional disminuirá;*

Reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> por trabajo de transporte, como promedio para todo el transporte marítimo internacional, en al menos un 40% de aquí a 2030 comparado con los niveles de 2008, y proseguir los esfuerzos hacia el 70% de aquí a 2050 comparado con los niveles de 2008.

- 3. Las emisiones de GEI procedentes del transporte marítimo internacional alcanzarán un máximo y luego disminuirán.*

Alcanzar lo antes posible el máximo de las emisiones de GEI procedentes del transporte marítimo internacional y reducir el total de las emisiones de GEI anuales en al menos un 50% de aquí a 2050 comparado con los niveles de 2008, prosiguiendo al mismo tiempo los esfuerzos para suprimirlas gradualmente como se prevé en la Visión, como punto en el camino de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> acorde con el Acuerdo de París.

Esta Estrategia Inicial es el primer hito en la "Hoja de ruta para elaborar una estrategia detallada de la OMI sobre la reducción de las emisiones de GEI procedentes de los buques", aprobada en el MEPC 70. En la Hoja de ruta se determina que en el 2023 se adoptará la Estrategia revisada. Las fases claves para la adopción de la Estrategia revisada se muestran en la Tabla 3 [16]:

Primavera 2018 (MEPC 72)	Adopción de la Estrategia inicial incluida, entre otras cosas, una lista de las posibles medidas adicionales a corto, medio y largo plazo con posibles plazos de implantación, que se revisará, según proceda, a medida que se disponga de información.
Enero 2019	Inicio de la fase 1: Recopilación de datos (los buques recopilan los datos)
Primavera 2019 (MEPC 74)	Inicio del cuarto Estudio de la OMI sobre los GEI utilizando datos de 2012-2018
Verano 2020	Notificación a la OMI de los datos de 2019
Otoño 2020 (MEPC 76)	Inicio de la fase 2: Análisis de datos (a más tardar en otoño de 2020) Publicación del cuarto Estudio de la OMI sobre los GEI para su examen por el MEPC 76
Primavera 2021 (MEPC 77)	Informe de la Secretaría en el que se resumen los datos de 2019 de conformidad con la Regla 22A.10 <sup>6</sup> . Inicio de la labor de perfeccionamiento de la Estrategia inicial de la OMI, basada en los datos del sistema de recopilación de datos.
Verano 2021	Notificación a la OMI de los datos de 2020
Primavera 2022 (MEPC 78)	Fase 3: Fase de decisión Informe de la Secretaría en el que se resumen los datos de 2020 de conformidad con la regla 22A.10
Verano 2022	Notificación a la OMI de los datos de 2021
Primavera 2023 (MEPC 80)	Informe de la Secretaría en el que se resumen los datos de 2021 de conformidad con la regla 22A.10. Adopción de la Estrategia revisada, incluidas las medidas adicionales a corto, medio y largo plazo, según sean necesarias, con los plazos de implantación.

**Tabla 3: Fases de implantación de la Estrategia Inicial de la OMI. Fuente: [16].**

Desde la adopción de la Estrategia, la OMI ha aprobado el "*Programa de medidas de seguimiento de la Estrategia inicial hasta 2023*" y ha realizado avances en el examen e implantación de algunas de las medidas de reducción de los GEI a corto plazo incluidas en la lista de posibles medidas que figuran en la Estrategia Inicial. En concreto:

- La aprobación del Procedimiento para evaluar las repercusiones de las posibles medidas en los Estados (*Resolución MEPC.1/Circ.885*)
- La continua mejora del marco de eficiencia energética existente, centrándose en el EEDI y el SEEMP, en particular mediante la adopción de las enmiendas al anexo VI de MARPOL sobre la aplicación anticipada de los requisitos de la fase 3 del EEDI para determinados tipos de buques. (*Resolución MEPC.324(75)*)
- El fomento de la elaboración y la presentación de planes de acción nacionales voluntarios por parte de los Estados miembros con miras a abordar las emisiones de GEI procedentes de los buques. (*Resolución MEPC.327(75)*)

<sup>6</sup> Véase Regla 22A. Recopilación y notificación de los datos sobre el consumo de fueloil del buque. Enmiendas al Anexo VI del Convenio Marpol. Anexo 3, Resolución MEPC.278(70) (adoptada el 28 de octubre de 2016).

- La Adopción de las enmiendas al Anexo VI del Convenio MARPOL sobre la medida a corto plazo basada en el objetivo de reducir de la intensidad de carbono basada en establecer medidas técnicas y operacionales de eficiencia energética para los buques (del EEXI y de los CII); junto con la aprobación de la evaluación amplia de las repercusiones.
- Encargo, supervisión y aprobación del Cuarto Estudio OMI sobre GEI 2020.
- Desarrollo inicial de las directrices sobre la intensidad del carbono/GEI en su ciclo de vida para todos los tipos de combustible, por parte del Grupo de trabajo interperiodos sobre la reducción de las emisiones de GEI procedentes de los buques.
- El refuerzo continuo de actividades de creación de capacidad y cooperación técnica, incluido un fondo fiduciario voluntario de donantes múltiples para respaldar las actividades de cooperación técnica y creación de capacidad de la Organización destinadas a apoyar la implantación de la Estrategia inicial.

Dentro del plan de trabajo para avanzar con las medidas candidatas a medio y a largo plazo, el MEPC incluye la de incentivar la transición de los combustibles fósiles hacia los combustibles de carbono bajo o nulo para lograr la descarbonización del transporte marítimo internacional. [16] Dentro de las posibles medidas adicionales a medio plazo tenemos las siguientes:

- Programa de implantación para la adopción efectiva de los combustibles alternativos con contenido de carbono bajo o nulo, incluida la actualización de los planes de acción nacionales para considerar específicamente dichos combustibles;
- Medidas de eficiencia energética operacionales tanto para los buques nuevos como los buques existentes, incluidos los indicadores acordes con el enfoque en tres etapas que puedan utilizarse para indicar y mejorar la eficiencia energética del transporte marítimo;
- Mecanismo o mecanismos nuevos/innovadores de reducción de las emisiones, que pueden incluir medidas de mercado, para incentivar la reducción de las emisiones de GEI;
- Proseguir y mejorar las actividades de cooperación técnica y creación de capacidad, tales como las contempladas en el PICT; y
- Elaborar un mecanismo de recopilación de información para poder compilar y compartir las lecciones aprendidas con la implantación de las medidas mediante un posible intercambio de información sobre las mejores prácticas.

Las posibles medidas adicionales a largo plazo de la Organización sobre cuestiones relacionadas con la reducción de las emisiones de GEI procedentes de los buques son las siguientes:

- Proseguir la elaboración y provisión de combustibles no fósiles o con contenido de carbono nulo para permitir al sector del transporte marítimo evaluar y examinar la posibilidad de la descarbonización en la segunda mitad del siglo; y
- Alentar y facilitar la adopción general de otros posibles mecanismos nuevos/innovadores de reducción de las emisiones.

Antes de adoptar medidas se deberían evaluar y tener en cuenta sus repercusiones para los Estados. Se debería prestar especial atención a las necesidades de los países en desarrollo, en particular, las de los pequeños Estados insulares en desarrollo y los países menos adelantados.

## **3.5. Escenario Económico.**

Las medidas obligatorias de eficiencia energética y la estrategia para la descarbonización del transporte marítimo establecida por la OMI necesitarán instrumentos financieros para el desarrollo de nuevas tecnologías, y para ello es necesario que las instituciones financieras inviertan en ellas.

La incorporación del sector privado, los bancos nacionales y las instituciones financieras internacionales de forma coordinada minimizaría el riesgo y apoyaría los proyectos de soluciones adecuadas para la descarbonización marítima en los países en desarrollo y en los países menos adelantados.

También es posible que los sistemas de incentivos y las futuras medidas basadas en el mercado, como los impuestos sobre el combustible u otras formas de fijación de precios del CO<sub>2</sub>, puedan constituir en el futuro una fuente de financiación adicional para la adopción de tecnologías innovadoras de reducción de emisiones.

### **3.5.1. Principios de Poseidón.**

Recientemente un grupo de once entidades financieras muy representativas en el ámbito naviero alcanzaron un acuerdo bautizado como los ‘Principios de Poseidón’, a través del cual se comprometen a mantener sus carteras orientadas hacia objetivos ambientalmente responsables. Para ello, incorporarán consideraciones climáticas en sus procedimientos globales y decisiones de financiación, en línea con la estrategia de la OMI ya comentada de reducir en un 50% las emisiones antes de 2050. Fuera de esas líneas, no se financiarán nuevos proyectos. [17]

Los Principios Poseidón se firmaron el 18 de junio de 2019 en Nueva York. Los fundadores y firmantes de esta iniciativa representan un 20% de préstamos a la industria naviera (unos 100 billones de dólares americanos) Citibank, Societe Generale, DNB, ABN Amro, ATB, Credit Agricole CIB, Danish Ship Finance, Danske Bank, DVB, ING y Nordea así como el Rocky Mountain Institute, el UCL Energy Institute, el Global Maritime Forum así como el Lloyd’s Register. Todas ellas entidades financieras globales, con destacada relevancia en el sector, y cuyo nuevo modelo de financiación tendrá un impacto a su vez en la economía. [17]

Los Principios Poseidón son una serie de líneas maestras orientadas hacia la descarbonización del sector se basan en cuatro pilares:

1. Evaluación del respeto ambiental.
2. Rendición de cuentas.
3. Cumplimiento.
4. Transparencia.

La aplicación de los principios dependerá de los bancos, por ello se espera que al menos aquellas operaciones que se aprueben, los sigan necesariamente. Se aplicarían también a todos los elementos que constituyan la cadena de valor del transporte marítimo.

### 3.6. Conclusiones del Capítulo 3.

- *El Acuerdo de París es un tratado internacional de la ONU sobre el cambio climático jurídicamente vinculante. Posee tres elementos claves:*
  1. *Limitar el aumento de las temperaturas a 1,5°C;*
  2. *Examinar la contribución de los países a la reducción de las emisiones cada 5 años;*
  3. *Ayudar a las naciones más pobres proporcionando financiación climática.*
- *La OMI es un organismo especializado de las Naciones Unidas que establece las normas para la seguridad y la protección del medio ambiente del sector marítimo internacional. Dentro de la Organización, el MEPC se encarga especialmente de la aprobación y enmienda de convenios y otras reglas y medidas para garantizar su observancia, destinadas a la prevención de la contaminación desde los buques.*
- *En el Anexo VI del Convenio Marpol: Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques, se establecen los límites de las emisiones de SOx y de NOx de los escapes de los buques y se prohíben las emisiones deliberadas de sustancias que agotan el ozono; para las zonas de control de emisiones designadas se establecen normas más estrictas en relación con la emisión de SOx, NOx y de materias particuladas; se regula la incineración a bordo, y las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) de los buques tanque; y se establecen medidas técnicas y operacionales obligatorias de eficiencia energética para reducir las emisiones de GEI procedentes de los buques.*
- *Dentro de las acciones con vistas a implantar y apoyar la eficiencia energética del sector, la OMI ha estado ejecutando una serie de proyectos mundiales entre los países en desarrollo, los pequeños estados insulares en desarrollo y los menos adelantados;*
- *La adopción de la Estrategia Inicial de la OMI sobre los GEI define los niveles de ambición para reducir las emisiones y los principios rectores: reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> por trabajo de transporte para todo el transporte marítimo internacional en al menos un 40 % al 2030, y proseguir los esfuerzos hacia el 70 % de aquí al 2050, y reducir el total de las emisiones de GEI anuales en al menos un 50% de aquí a 2050 comparado con los niveles del 2008.*
- *Como programa de seguimiento de la Estrategia Inicial el MEPC incluye una lista de posibles medidas adicionales a corto, medio y largo plazo, con los plazos posibles y sus repercusiones para los Estados.*
- *Las medidas obligatorias de eficiencia energética y la estrategia para la descarbonización del transporte marítimo establecida por la OMI necesitarán instrumentos financieros para el desarrollo de nuevas tecnologías. Un grupo de entidades financieras alcanzaron un acuerdo llamado Principios de Poseidón, que establecen una serie de líneas maestras orientadas hacia la descarbonización del sector.*

## Capítol 4. Análisis de la normativa y propuestas tecnológicas para el ahorro de energía.

El conjunto de regulaciones y enmiendas aprobadas por el MEPC basándose en los requisitos obligatorios actuales para disminuir aún más las emisiones de GEI del transporte marítimo, requerirá que los barcos combinen un enfoque técnico y operativo para reducir su intensidad de carbono en un 40 % para el 2030, en comparación con el 2008.

Dentro del desarrollo de las medidas a corto plazo de la estrategia inicial (Resolución MEPC.304(72)) [16], el proyecto de enmiendas agregará más requisitos a las medidas de eficiencia energética del Capítulo 4, Anexo VI del MARPOL.

Los requisitos actuales se basan en el Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI), para buques de nueva construcción, lo que significa que deben construirse y diseñarse para ser más eficientes que la línea base; y el Plan de Gestión de la Eficiencia Energética de los Buques (SEEMP), obligatorio para todos los buques, el que prevé que los operadores de buques cuenten con un plan para mejorar la eficiencia energética a través de una variedad de medidas específicas.

El conjunto de las nuevas enmiendas se basan en estas medidas e introducen nuevos requisitos para medir y evaluar la eficiencia energética de todos los barcos y así establecer los valores y logros obtenidos. El conjunto de enmiendas incluye el requisito técnico para reducir la intensidad de carbono, basado en un nuevo Índice de Eficiencia Energética de Buques Existentes (EEXI); y los requisitos operativos de reducción de la intensidad de carbono, basados en un nuevo indicador operativo de intensidad de carbono, CII.

Las nuevas medidas a corto plazo requerirán que todos los barcos calculen su Índice de Eficiencia Energética de Barcos Existentes, siguiendo medios técnicos para mejorar su eficiencia energética y, adicionalmente, establecer su indicador de intensidad de carbono operativo anual y su calificación CII.

El EEDI y el EEXI son las medidas técnicas más importantes. Se aplican respectivamente, a los buques de nueva construcción y a los existentes. El SEEMP y el CII son las medidas operativas más importantes. Mientras que EEDI, EEXI y SEEMP son aplicables a los buques de 400 GT o más, los requisitos del CII sólo serán aplicables a los buques de más de 5000 GT, ya que están conectados al sistema de recopilación de datos (DCS) de la OMI.

El sistema DCS entró en vigor en marzo de 2018, y obliga a los buques de más de 5000 GT a recopilar datos sobre el consumo de fueloil utilizado. Los datos obtenidos se comunican anualmente al Estado de abanderamiento y, a continuación, se transmiten a la base de datos de la OMI sobre el

consumo de combustible de los buques. En el SEEMP se incluirá la metodología utilizada para recopilar los datos y comunicarlos al Estado miembro.

Las innovaciones técnicas y la introducción mundial de combustibles y/o fuentes de energía alternativos para el transporte marítimo internacional serán fundamentales para alcanzar la ambición establecida en la Estrategia inicial de la OMI.

El cumplimiento de lo dispuesto en el Convenio MARPOL y en otros instrumentos de la OMI, así como las medidas adoptadas por muchas empresas, más estrictas que las prescripciones obligatorias, contribuirán a limitar aún más estas repercusiones ambientales. No obstante, el incremento de la eficiencia permite reducir el consumo de combustible, ahorrar dinero y atenuar las repercusiones ambientales de cada buque. Si bien el efecto de cada una de estas medidas puede ser limitado, el efecto colectivo en la totalidad de la flota será considerable.

## **4.1. Índice de diseño de eficiencia energética: EEDI.**

El Índice de Diseño de Eficiencia Energética trata de la medida más importante para inducir a las empresas a utilizar buques de nueva construcción más eficientes desde el punto de vista energético y menos contaminantes. El índice entró en vigor en el 2013 y se expresa en gramos de CO<sub>2</sub> emitidos por unidad de trabajo de transporte (*gCO<sub>2</sub>/tonelada-milla*). Por lo tanto, un valor elevado del índice caracteriza a un buque con una baja eficiencia energética.

El EEDI difiere en función de los tipos y segmentos de buques, así como de la reducción relativa del índice que debe alcanzarse. Cada cinco años se ajusta el nivel de referencia del EEDI para los buques de nueva construcción y se fijan objetivos más estrictos. Las empresas son libres de elegir la tecnología más eficientes. Esta libertad debería estimular la innovación y la rentabilidad.

En los próximos años, la eficiencia energética se medirá comparando el valor del EEDI con el valor de referencia fijado inicialmente. Para la primera fase se establece un nivel de reducción de CO<sub>2</sub> (*gCO<sub>2</sub>/tonelada-milla*) de un 10%. Las tasas de reducción se han establecido hasta el período que comienza en 2025, cuando entrará en vigor una reducción de un 30% para los tipos de buques aplicables, que se calculará a partir de un nivel de referencia que representa la eficiencia media de los buques construidos entre 2000 y 2010. Esto quiere decir que para 2025, todos los nuevos buques serán un 30% más eficientes desde el punto de vista energético que aquellos construidos en el 2014. [18]

Inicialmente se aplicaba a buques tanques, graneleros, gaseros, cargueros generales, portacontenedores, cargueros refrigerados y cargueros combinados. Sin embargo, en 2014 se amplió la selección de buques en el ámbito de aplicación. Se añadieron buques de transporte de gas natural licuado, buques de carga Ro-Ro, buques de pasajeros Ro-Pax y buques de pasajeros de crucero con propulsión no convencional. Las normas son aplicables a los buques de nueva construcción mencionados, superior a 400 GT.



En los buques portacontenedores la tasa de reducción del EEDI se incrementa de forma significativa para los buques de mayor tamaño de la siguiente manera:

- Para un buque portacontenedores de 200.000 TPM y más, la tasa de reducción del EEDI se fija en el 50% a partir de 2022.
- Para un buque portacontenedor igual o superior a 120.000 TPM pero menor que 200.000 TPM, 45% a partir de 2022.
- Para un buque portacontenedor igual o superior a 80.000 TPM pero menor que 120.000 TPM, el 40% a partir de 2022.
- Para un buque portacontenedor igual o superior a 40.000 TPM pero menor que 80.000 TPM, el 35% a partir de 2022.
- Para un buque portacontenedor igual o superior a 15.000 TPM pero menor que 40.000 TPM, el 30% a partir de 2022.

#### 4.1.1. Metodología de cálculo del EEDI.

Según la *Regla 20*, Capítulo 4, Anexo VI del MARPOL [15] el EEDI obtenido será específico para cada buque, indicará el rendimiento estimado del buque en términos de eficiencia energética e irá acompañado del expediente técnico del EEDI que contenga la información necesaria para el cálculo del EEDI obtenido y muestre el proceso de cálculo. La Administración o una organización debidamente autorizada por ella verificará el EEDI obtenido basándose en el expediente técnico del EEDI.

El EEDI obtenido para los buques nuevos se calcula aplicando la ecuación 1 [19]:

$$\frac{\left( \prod_{j=1}^n f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + \left( P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) + \left( \prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} - \left( \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_j \cdot f_c \cdot Capacidad \cdot f_w \cdot V_{ref}} \quad (1)*$$

*\*Si parte de la carga normal máxima en el mar se obtiene con generadores acoplados al eje, para dicha parte de la potencia podrán utilizarse  $SFC_{ME}$  y  $CF_{ME}$  en vez de  $SFC_{AE}$  y  $C_{FAE}$ . En caso de que  $P_{PTI(i)} > 0$ , se utilizará el valor medio ponderado de  $(SFC_{ME} \cdot C_{FME})$  y  $(SFC_{AE} \cdot C_{FAE})$  para calcular  $P_{eff}$ .*

Nota: Es posible que esta fórmula no sea aplicable a los buques que tengan propulsión diésel-eléctrica, propulsión mediante turbina o sistemas de propulsión híbridos, salvo los buques de pasaje de crucero y los buques para el transporte de gas natural licuado (GNL).

Donde:

$C_f$ : Factor de conversión adimensional entre el consumo de combustible (medido en gramos) y las emisiones de CO<sub>2</sub> (también medidas en g), basándose en el contenido de carbono. Los subíndices  $ME(i)$  y  $AE(i)$  corresponden a los motores principales y auxiliares, respectivamente.

$V_{ref}$ : Velocidad del buque, medida en millas marinas por hora (*nudos*) en aguas profundas en la condición correspondiente a la capacidad, con la potencia al eje del motor o motores, y en supuestas condiciones meteorológicas favorables, sin viento ni olas.

*Capacidad*: Para los graneleros, buques tanque, gaseros, buques para el transporte de GNL, buques de carga rodada (buques para el transporte de vehículos), buques de carga rodada, buques de pasaje de transbordo rodado, buques de carga general, buques frigoríficos y buques de carga combinada debería utilizarse el peso muerto como capacidad.

Para los buques de pasaje y los buques de pasaje de crucero debería utilizarse como capacidad el arqueado bruto.

Para los buques portacontenedores, debería utilizarse el 70% del peso muerto como capacidad.

$P$ : potencia de los motores principales y auxiliares, medida en *kW*. Los subíndices  $ME(i)$  y  $AE(i)$  corresponden a los motores principales y auxiliares, respectivamente.

$SFC$ : consumo de combustible específico certificado de los motores o turbinas de vapor, medido en *g/kWh*. Los subíndices  $ME(i)$  y  $AE(i)$  se refieren a los motores principales y auxiliares, respectivamente.

*Coefficiente  $f_j$* : factor de corrección que permite tener en cuenta los elementos de proyecto específicos del buque.

$f_w$ : coeficiente adimensional que indica la disminución de velocidad en condiciones del mar representativas en cuanto a la altura y frecuencia de las olas y la velocidad del viento.

$f_{eff(i)}$ : factor de disponibilidad de una tecnología innovadora de eficiencia energética. Para los sistemas de recuperación de energía residual se considera que  $f_{eff(i)}$  equivale a 1 (1,0)

$f_i$ : factor de capacidad para cualquier limitación técnica/normativa de la capacidad y debería considerarse igual a 1 (1,0) si el factor no se estima necesario.

$f_c$ : factor de corrección de la capacidad cúbica y debería considerarse igual a uno (1,0) si el factor no se estima necesario.

El EEDI obtenido se calculará y se ajustará a lo prescrito por la *Regla 21*, Capítulo 4, Anexo VI del MARPOL, con el factor de reducción aplicable que corresponda al tipo y tamaño específicos del buque.

Por EEDI prescrito se entiende el valor máximo del EEDI obtenido permitido y se determina mediante la ecuación 2, como sigue:

$$EEDI_{obtenido} \leq EEDI_{prescrito} = \left(1 - \frac{X}{100}\right) \cdot \text{valor del nivel de referencia} \quad (2)$$

Donde:

X: factor de reducción (en porcentaje) de conformidad con el *Cuadro 1* de la *Regla 21* del Anexo VI del Convenio MARPOL [15], relativo a la fase y el tamaño aplicables de los buques nuevos .Ver un fragmento del *Cuadro 1* en la figura 9.

y el valor del nivel de referencia se determina mediante la ecuación 3:

$$\text{valor del nivel de referencia} = a \cdot b^{-c} \quad (3)$$

Siendo los valores de *a*, *b* y *c* los parámetros que se especifican en el *Cuadro 2* de la *Regla 21* del Anexo VI del Convenio MARPOL [15]. Ver un fragmento del *Cuadro 2* en la figura 10.

*Cuadro 1: Factores de reducción (en %) del EEDI en comparación con el nivel de referencia del EEDI*

Tipo de buque	Tamaño	Fase 0 [1 enero 2013 a 31 dic. 2014]	Fase 1 [1 enero 2015 a 31 dic. 2019]	Fase 2 [1 enero 2020 a 31 dic. 2024]	Fase 3 [A partir del 1 enero 2025]
Granelero.	20 000 TPM o más	0	10	20	30
	10 000 - 20 000 TPM	n/a	0-10*	0-20*	0-30*
Buque gasero.	10 000 TPM o más	0	10	20	30
	2 000 - 10 000 TPM	n/a	0-10*	0-20*	0-30*

**Figura 9: Factores de reducción del EEDI, fragmentos. Fuente [15]**

*Cuadro 2: Parámetros para la determinación de los valores de referencia de los distintos tipos de buques*

Tipo de buque definido en la regla 2	a	b	c
2.25 Granelero.	961,79	Peso muerto del buque.	0,477
2.26 Buque gasero.	1 120,00	Peso muerto del buque.	0,456

**Figura 10: Parámetros para el cálculo de los valores de referencia, fragmentos. Fuente [15]**

## 4.2. Índice de eficiencia energética de los buques existentes: EEXI.

El índice de eficiencia energética de los buques existentes (EEXI) está dentro de las medidas a corto plazo introducida por la OMI para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de los buques. Se aprobó en noviembre de 2020, y puede considerarse una adición a los requisitos EEDI para los buques existentes. Se basa en un factor de reducción requerido (expresado como un porcentaje relativo a la línea de base EEDI).

El EEXI es una medida relacionada con el diseño técnico. Es un requisito aplicable únicamente a los buques existentes de navegación internacional de más de 400 GT. Los barcos deben aprobar el valor EEXI alcanzado al menos una vez a más tardar en la primera inspección periódica en 2023.

El EEXI obtenido debería calcularse de conformidad con la *Regla 23* del Anexo VI del Convenio MARPOL y según las Directrices del 2021 sobre el método de cálculo del índice de eficiencia energética aplicable a los buques existentes (EEXI) obtenido (Resolución MEPC.333(76)) (Directrices sobre el cálculo del EEXI).

El EEXI obtenido mide la eficiencia energética del buque ( $gCO_2/tonelada-milla$ ) y se calcula aplicando la siguiente ecuación 4 [20]:

$$\frac{\left( \prod_{j=1}^n f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + \left( P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) + \left( \left( \prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)} \right) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) - \left( \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_c \cdot f_i \cdot \text{Capacidad} \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m} \quad (4)*$$

*\*Si parte de la carga normal máxima en el mar se obtiene con generadores acoplados al eje, para dicha parte de la potencia podrán utilizarse  $SFC_{ME}$  y  $C_{FME}$  en vez de  $SFC_{AE}$  y  $C_{FAE}$ . En caso de que  $P_{PTI(i)} > 0$ , se utilizará el valor medio ponderado de  $(SFC_{ME} \cdot C_{FME})$  y  $(SFC_{AE} \cdot C_{FAE})$  para calcular  $P_{eff}$ .*

Nota: Es posible que esta fórmula no sea aplicable a los buques que tengan propulsión diésel-eléctrica, propulsión mediante turbina o sistemas de propulsión híbridos, salvo los buques de pasaje de crucero y los buques para el transporte de GNL.

Donde:  $f_i$ : es el factor para los buques de carga general equipados con grúas y otros dispositivos relacionados con la manipulación de la carga para compensar una pérdida de peso muerto del buque.

$f_m$ : factor de valor 1, (1,0). No se especifica.

Para el cálculo del EEXI obtenido mediante la ecuación (4) se aplican los parámetros de las Directrices sobre el cálculo del EEDI, salvo que se disponga expresamente lo contrario. [...] [20]

Los buques que entren en el ámbito de aplicación de la prescripción del EEDI pueden utilizar su EEDI obtenido como el EEXI obtenido, si el valor del EEDI obtenido es igual o inferior al del EEXI prescrito.

Para cumplir las prescripciones del EEXI y la utilización de una reserva de potencia en los buques, se espera que próximamente entren en vigor medidas técnicas y operacionales obligatorias donde los buques estén provistos de un sistema de limitación de la potencia máxima en el eje (sistema SHaPoLi) por medios técnicos, y del motor (sistema EPL), con el objetivo de reducir la intensidad de carbono emitido por el transporte marítimo.

### 4.3. Plan de gestión de la eficiencia energética de los buques: SEEMP.

El Plan de Gestión de la Eficiencia Energética de los Buques (SEEMP) es una medida operativa obligatoria para reducir las emisiones y mejorar la eficacia de los buques existentes de arqueo bruto

superior a 400 GT. Mediante esta medida la OMI proporciona directrices sobre las mejores prácticas para el funcionamiento eficiente de los buques desde el punto de vista energético, así como directrices para la utilización voluntaria del indicador operacional de la eficiencia energética (EEOI).

Podemos decir que el SEEMP insta al propietario del buque y al armador en cada etapa del Plan a examinar la posibilidad de incorporar nuevas tecnologías y prácticas cuando se trata de optimizar el rendimiento de un buque. Debería elaborarse como un Plan específico para cada buque, y su elaboración debería estar a cargo del propietario o el armador del buque o de cualquier otra parte pertinente, por ejemplo el fletador.

El SEEMP consta de dos partes. La parte I del SEEMP facilita un posible enfoque para vigilar la eficiencia de los buques y la flota en el transcurso del tiempo. La parte II del SEEMP facilita las metodologías que el buque de arqueado bruto igual o superior a 5 000 debería utilizar para recopilar los datos prescritos de conformidad con la *Regla 22A* del Anexo VI del Convenio MARPOL, así como los procesos que el buque debería utilizar para notificar los datos a su Administración o a cualquier organización debidamente autorizada por ella.

### **4.3.1. Marco y estructura de la Parte I del SEEMP.**

El SEEMP tiene como objetivo incrementar la eficiencia energética de un buque en cuatro fases: *planificación, implantación, vigilancia y autoevaluación y mejora*. Estos componentes desempeñan un papel decisivo en el ciclo continuo para mejorar la gestión energética del buque.[21]

La planificación es la fase más importante del SEEMP, ya que en ella se establece tanto la situación actual del consumo de energía de un buque como la mejora prevista de la eficiencia energética del mismo.

Las etapas de la planificación que deben adoptarse para incrementar la eficiencia de los buques son las siguientes:

- Medidas específicas del buque en concreto según el tipo de buque, la carga, las rutas y otros factores específicos, y que consideren opciones que mejoran la eficiencia como la optimización de la velocidad, la navegación meteorológica y el mantenimiento del casco, por ejemplo.
- Medidas específicas de la compañía para gestionar la flota, teniendo en cuenta la coordinación entre las partes interesadas.
- Desarrollo de los recursos humanos mediante la formación del personal para que las medidas se implanten de forma segura y eficaz.
- Establecimiento de los objetivos de forma cuantificable y fáciles de entender.

Una vez determinadas las medidas, se requiere un procedimiento para la implantación, formado por las siguientes etapas:

- Establecimiento de un sistema de implantación.
- Implantación y registro

Seguidamente se debe establecer un sistema de vigilancia de la eficiencia energética mediante:

- Instrumentos de vigilancia: el EEOI es un indicador cuantitativo de la eficiencia energética, por lo tanto se considera como el principal instrumento de vigilancia.

El EEOI es un instrumento de supervisión para gestionar el rendimiento de los buques y la eficiencia de la flota a lo largo del tiempo. Permite a los armadores medir el consumo eficiente de combustible de un buque en servicio y calibrar el efecto de cualquier cambio que se produzca en el funcionamiento del buque, como por ejemplo, mejorar la planificación de la travesía, del viaje o realizar una limpieza más frecuente de las hélices, o introducir medidas técnicas como sistemas de recuperación del calor residual o una nueva hélice.

- Establecimiento del sistema de vigilancia: una recopilación de datos continua y coherente constituye la base de la vigilancia.

La autoevaluación y la mejora es la etapa final del ciclo de gestión donde debe obtenerse la información útil para la posterior etapa de planificación. Tiene como objetivo evaluar la eficacia de las medidas previstas y su implantación, permite identificar qué tipo de medidas pueden o no funcionar según las características de funcionamiento del buque y además, conocer la tendencia de mejora de la eficiencia del buque.

### **4.3.2. Plan de recuperación de datos sobre el consumo de fueloil de los buques, Parte II del SEEMP.**

A partir del 2018, en el caso de un buque de arqueado bruto igual o superior a 5000, el SEEMP en la Parte II incluye una descripción de la metodología que se utilizará para recopilar los datos y los procesos que se utilizarán para notificar los datos a la Administración del buque, (*Resolución MEPC.278 (70)*).

La metodología que se utilizará para recopilar los datos prescritos por la *Regla 22A.1* del Anexo VI del MARPOL se basa en reunir datos del buque sobre el consumo anual de fueloil, la distancia recorrida, las horas de navegación y otros datos prescritos, en un formato normalizado elaborado por la Organización.

Para registrar el consumo de fueloil se debería incluir todo el combustible que se consume a bordo: el combustible consumido por los motores principales, motores auxiliares, turbinas de gas, calderas y generadores de gas inerte, para cada tipo de combustible consumido, independientemente de si un buque está navegando o no. Para recopilar datos sobre el consumo anual (en toneladas métricas), se emplean los siguientes métodos:

- Las notas de entrega de combustible; se determina la cantidad anual de combustible entregado y utilizado a bordo.

- Mediante caudalímetros; midiendo los caudales de combustible a bordo durante un año. Se debe aportar información sobre los caudalímetros, y de cómo se realizan las lecturas del tanque.
- La vigilancia del tanque de combustible líquido; se sumarán las cantidades de consumo diario de fueloil empleando sistemas automatizados, sondeos y cintas de inmersión, siempre que el buque esté en el mar y cada vez que se realice un abastecimiento o vaciado del tanque.

Si los combustibles que se utilizan no entran en la categoría que se describen en el método de cálculo del EEDI obtenido, y no tienen asignado el factor  $C_f$  (algunos combustibles híbridos, por ejemplo), el proveedor debería facilitar un factor para el producto respaldado por pruebas documentales.

La distancia en millas marinas recorrida debe notificarse a la Administración, según el apéndice IX del Anexo VI del MARPOL, y debería registrarse en el diario de navegación del buque. Además debe incluirse la distancia que recorre el buque cuando está navegando con propulsión propia, así como otros métodos de medición de distancia aprobados por la Administración en los que se describa a fondo el plan de recopilación de datos.

Las horas de navegación que correspondan al tiempo total en el que el buque está navegando con propulsión propia, deben notificarse a la Administración.

En caso de que se realice la medición directa de las emisiones de CO<sub>2</sub> deberían determinarse los caudales de las emisiones de CO<sub>2</sub> presente en los gases de escape mediante un equipo de medición directa colocado de manera que mida todas las emisiones del buque. Además se llevará un registro exhaustivo de las lecturas, las ubicaciones de todos los equipos y la documentación de estos.

El plan de recopilación de los datos debería incluir medidas de control de la calidad de los datos que convendría incorporar en el sistema existente de gestión de la seguridad de a bordo.

## **4.4. Indicador de la intensidad de carbono: CII.**

En la Estrategia inicial de la OMI sobre la reducción de las emisiones de GEI procedentes de los buques [20], el nivel de ambición sobre la intensidad de carbono del transporte marítimo internacional se cuantifica mediante las emisiones de CO<sub>2</sub> por trabajo de transporte, como promedio en todo el transporte marítimo internacional. La intensidad de carbono vincula las emisiones de GEI con la cantidad de carga transportada a lo largo de la distancia recorrida.

Las reglas y las directrices sobre el indicador de la intensidad de carbono (CII) establecen un marco para asignar las clasificaciones del CII y estimular la mejora continua para alcanzar la reducción del 40% en toda la flota para el 2030 acordada en la Estrategia Inicial de la OMI sobre los GEI. El cálculo y la determinación de los factores de reducción del CII tienen por objetivo determinar o estimar la mejora de la eficiencia relativa entre 2008 y la actualidad.

El indicador de la intensidad de carbono operacional deberían aplicarse a todos los buques regidos por la *Regla 28* del Anexo VI del Convenio MARPOL<sup>7</sup>. Esto es para que los buques de arqueo bruto igual o superior a 5000 (los buques que ya están sujetos al requisito de un sistema DCS para el consumo de fueloil de los buques) hayan determinado su indicador de intensidad de carbono operativo anual requerido. El CII determina el factor de reducción anual necesario para garantizar la mejora continua de la intensidad de carbono operativa del barco dentro de un nivel de calificación específico.

El *CII operacional anual obtenido de los buques (CII obtenido)* se calcula como la relación entre la masa total de CO<sub>2</sub> (*M*) emitida, y el trabajo de transporte (*W*) total realizado en un año civil determinado (Anexo 10, [20]), como se indica a continuación:

$$CII_{buque\ obtenido} = M/W \quad (5)$$

Donde:

La masa total de CO<sub>2</sub> (*M*) es la suma de las emisiones de CO<sub>2</sub> (en gramos) de todo el fueloil consumido a bordo de un buque en un año civil determinado.

El trabajo de transporte (*W*)<sup>8</sup> se define como el producto de la capacidad de un buque por la distancia recorrida en un año civil determinado.

El nivel de referencia del indicador de la intensidad de carbono operacional (*CII<sub>ref</sub>*) se define como una curva que representa la mediana del funcionamiento en cuanto a la intensidad de carbono operacional obtenido, en función de la capacidad, de un grupo definido de buques en 2019. (Anexo 11, [20])

Dado que los datos disponibles para 2008 son limitados, se toma como referencia el funcionamiento en cuanto a la intensidad de carbono operacional de los tipos de buques en 2019.

Para un grupo definido de buques, el nivel de referencia se formula como se indica a continuación:

$$CII_{ref} = a \cdot Capacity^{-c} \quad (6)$$

---

<sup>7</sup> El Anexo VI revisado del 2021 del Convenio MARPOL contiene enmiendas sobre medidas técnicas y operacionales obligatorias basadas en objetivos para reducir la intensidad de carbono del transporte marítimo internacional. Se espera que entre en vigor el 1 de noviembre de 2022 tras su aceptación prevista el 1 de mayo de 2022. En la *Regla 28.1* del Anexo VI del Convenio MARPOL se prescribe que para los buques a los que se aplica dicha regla se calcule el *CII* operacional anual obtenido teniendo en cuenta las directrices elaboradas por la Organización.

<sup>8</sup> A falta de datos sobre el trabajo de transporte real, puede aceptarse como equivalente el trabajo de transporte basado en la oferta (*Ws*). El *CII* específico, para cuyo cálculo se acepta la capacidad de un buque como equivalente de la masa o el volumen reales de la carga transportada a bordo, suele denominarse *CII basado en la oferta*.



Donde:

$CII_{ref}$  es el valor de referencia.

La capacidad (*Capacity*) para los graneleros, buques tanque, portacontenedores, gaseros, buques para el transporte de GNL, buques de carga rodada, buques de carga general, buques frigoríficos y buques de carga combinada, toneladas de peso muerto (*TPM*). En el caso de los buques de pasaje dedicados a cruceros, los buques de carga rodada (buques para el transporte de vehículos) y los buques de pasaje de transbordo rodado, debería utilizarse el arqueado bruto (*GT*).

$a$  y  $c$  son parámetros estimados a través de ajustes de regresión de la mediana, según el CII obtenido y la capacidad de cada buque registrados mediante el DCS de la OMI en 2019.

Los factores de reducción se han establecido en los niveles necesarios para garantizar que pueda lograrse la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> por trabajo de transporte en al menos un 40 % para 2030, en comparación con 2008, como promedio en todo el transporte marítimo internacional. (Anexo 12, [20])

El factor de reducción de la intensidad de carbono operacional anual ( $Z$ ) es un valor positivo, que determina los puntos porcentuales del indicador de la intensidad de carbono operacional anual prescrito de un buque para un año determinado inferior al valor de referencia. La referencia general a los factores de reducción ( $Z$ ) para el CII operacional anual prescrito de los tipos de buques desde el 2020 hasta 2030 se muestran en la Tabla 4.

Año:	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Z (%) Ref: 2019	1	2	3	5	7	9	11	--*	--*	--*	--*
*Los factores Z para el año 2027 al 2030 se reforzarán y se desarrollarán posteriormente.											

**Tabla 4: Factor de reducción (Z %) para el CII con respecto al nivel de referencia de 2019. Fuente [20]**

El CII operacional anual prescrito de un buque se calcula como se indica a continuación:

$$CII_{prescrito} = \left(1 - \frac{Z}{100}\right) \cdot CII_{ref} \quad (7)$$

Seguidamente, debería asignarse anualmente una clasificación del funcionamiento en cuanto a eficiencia energética operacional a cada buque al que se aplique la *Regla 28*.

La *Clasificación de la intensidad de carbono operacional* es la asignación de una etiqueta de clasificación de entre los cinco grados (A, B, C, D y E) al buque en función del indicador de la intensidad de carbono operacional anual obtenido, que indicará un nivel de funcionamiento muy superior, superior, moderado, inferior o muy inferior.

Los límites se establecen en función de la distribución de los CII de cada buque en 2019. Se espera que los límites de clasificación adecuados generen los siguientes resultados: al 30% medio de los buques del segmento de la flota, por lo que respecta a los CII operacionales anuales obtenidos, se les asignará la clasificación C, mientras que al 20% más alto y al 15% todavía más alto de los buques se les asignarán las clasificaciones D y E, respectivamente, y al 20% más bajo y al 15% todavía más bajo de cada buque se les asignarán las clasificaciones B y A, respectivamente, como se muestra en la figura 11.

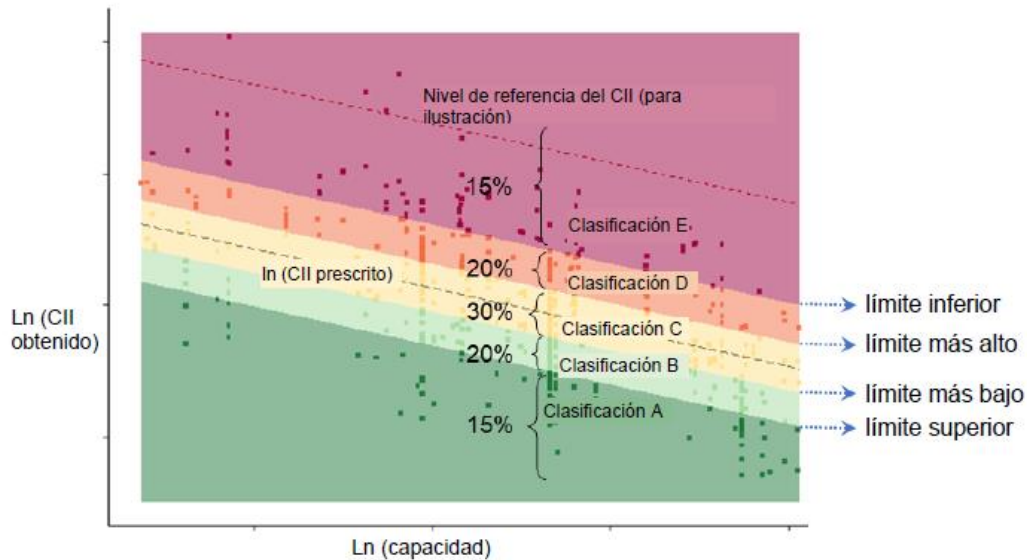


Figura 11: Escala de clasificación del funcionamiento en cuanto a eficiencia energética operacional. Fuente Anexo 13 [20]

Dado que los factores de reducción de la intensidad del carbono operacional aumentan con el tiempo, los límites para definir las clasificaciones del funcionamiento deberían sincronizarse en consecuencia, aunque la distancia relativa entre los límites no debería cambiar.

## 4.5. Propuestas de soluciones tecnológicas.

Al tratar de incrementar la eficiencia en la totalidad de la cadena de transporte, las responsabilidades van más allá de las que pueda asumir el propietario/armador por su cuenta. La lista de todas las partes que influyen en la eficiencia de un determinado viaje es larga; las partes obvias en lo que hace las características del buque son los proyectistas, los astilleros y los fabricantes de motores y, en lo relativo a cada viaje en particular, los fletadores, los puertos, los servicios de gestión del tráfico marítimo y otros. Todas las partes pertinentes deberían considerar la posibilidad de tomar medidas para incrementar la eficiencia en sus actividades, tanto a nivel individual como colectivo.

Siguiendo las mejores prácticas para el funcionamiento de los buques se puede lograr un consumo eficiente de combustible. Las operaciones que pueden contribuir al consumo eficiente de combustible pueden ser:

- *Mejora de la planificación de la travesía, logrando la ruta y tiempo óptimos durante el viaje.*
- *La navegación meteorológica.*
- *Justo a tiempo: obteniendo información de manera temprana con el puerto para saber con antelación la disponibilidad de atraques, facilitando la navegación y maniobras a velocidades óptimas.*
- *Optimización de la velocidad: mediante la velocidad óptima se pueden obtener ahorros considerables de combustible; entiéndase la velocidad a la cual se consume el nivel mínimo de combustible por tonelada/milla durante el viaje.*
- *Optimización de la potencia al eje.*
- *Optimización del gobierno del buque mediante:*
  - *El asiento óptimo.*
  - *Lastre óptimo.*
  - *La optimización de la hélice y de su flujo.*
  - *Uso óptimo del timón y de los sistemas de control del rumbo.*
  - *Mantenimiento del casco.*
  - *Sistema de propulsión.*
  - *Mantenimiento del sistema de propulsión.*
- *Recuperación del calor residual*
- *Mejora en la gestión de la flota*
- *Mejora de la manipulación de la carga.*
- *Gestión de la energía.*
- *Considerar la posibilidad de usar combustibles alternativos.*
- *Otras medidas.*

*Todas estas opciones que pueden mejorar la eficiencia energética de los buques dependen por lo general de la zona de tráfico, del tipo de navegación y de la edad y vida útil del buque.*

### 4.5.1. Combustibles alternativos.

Al descarbonizar el transporte marítimo se necesitarán combustibles de bajo o nulo contenido en carbono. Para las diferentes opciones de combustible, es necesario tener en cuenta cuestiones como la seguridad, la normativa, los precios, la disponibilidad de infraestructuras, las emisiones de GEI del ciclo de vida, las limitaciones de la cadena de suministro, los obstáculos para la adopción, etc.

El ciclo de vida se refiere a la evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero desde la producción del combustible hasta su uso final a bordo de un buque (*Well-to-Wake*); incluyendo desde la producción primaria hasta el transporte del combustible en el tanque del buque (*Well-to-Tank*, también conocido como emisiones de subida) y desde el tanque de combustible del buque hasta el escape (*Tank-to-Propeller o Tank-to-Wake*, también conocido como emisiones de bajada)

Ante el reto de cumplir el nuevo límite de contenido de azufre (inferior al 0,5%) del combustible de los buques, las soluciones más comúnmente aceptadas por el sector naviero están siendo:

- Utilizar los combustibles como el VLSFO, o el tradicional MGO cuyos contenidos de azufre son inferiores al 0,5%;
- Seguir utilizando el HFO convencional e instalar depuradoras de gases de escape (Scrubers) en los buques, para cumplir el citado límite del 0,5%;
- Quemar LNG que exige re-motorizar los buques o encargar buques nuevos.

Los futuros combustibles de baja y nula emisión de carbono para el transporte marítimo tienen diversas vías de producción (por ejemplo, diferentes generaciones de biocombustibles o combustibles a base de hidrógeno producidos por fuentes de energía renovables o combustibles fósiles) que conllevan diferencias significativas en su huella medioambiental global.

En los estudios recientes del Banco Mundial sobre los combustibles líquidos [22] se han llevado a cabo el análisis de una selección representativa de combustibles líquidos sin emisiones de carbono para identificar los combustibles potenciales más prometedores para descarbonizar el transporte marítimo internacional en la actualidad.

Los posibles combustibles y propulsores futuros para el transporte marítimo incluyen: metanol, biocombustibles, energía eléctrica, pilas de combustible, hidrógeno, hidrocarburos sintéticos, los electrocombustibles y el amoníaco, fundamentalmente.

#### Gas Natural Licuado (GNL).

El interés por el GNL como combustible para el transporte marítimo ha aumentado recientemente, principalmente en respuesta a los límites de las políticas mundiales sobre los niveles de azufre y NOx que se encuentran en los combustibles predominantes. El GNL se obtiene actualmente a partir de metano fósil. Se enfría a -162 °C para aumentar su densidad energética (es decir, energía por unidad de volumen) y reducir así el volumen de almacenamiento a bordo, lo que permite su transporte a larga distancia con fines comerciales o su utilización como combustible de transporte

marítimo. Otras razones para la adopción del GNL como combustible de transporte marítimo se derivan de su costo competitivo, en comparación con otros combustibles de bajo contenido de azufre derivados del petróleo [24]

El GNL también tiene el potencial de reducir las emisiones de óxidos de azufre y otros contaminantes atmosféricos locales (en particular NOx y partículas), además de los beneficios de la diversificación energética de los combustibles derivados del petróleo. El uso de GNL genera aproximadamente un 15% a 20% menos de emisiones directas de CO<sub>2</sub> en comparación con los combustibles derivados del petróleo, gracias al contenido de carbono comparativamente bajo del metano [24].

La adopción limitada del GNL se debe en gran parte a las profundas modificaciones necesarias para cambiar los buques existentes de HFO a GNL. En comparación, las depuradoras de los buques son más fáciles de adaptar y el cambio a VLSFO no requiere modificaciones. Los desafíos relativos de la conversión de los buques existentes a GNL, significan que la adopción del GNL como combustible para el transporte marítimo ha sido impulsada principalmente por nuevos pedidos de buques, lo que inevitablemente ha dado lugar a una introducción progresiva. Otros obstáculos son la menor flexibilidad en cuanto a las escalas portuarias, ya que ello requiere una amplia disponibilidad de infraestructuras de abastecimiento de combustible.

Sin embargo, el uso de GNL en los motores de los buques a menudo conduce al deslizamiento de metano. Se trata de un fenómeno por el cual una fracción de gas natural pasa por el motor sin quemar y se libera a la atmósfera. Dado que el metano es un potente GEI, esto reduce considerablemente los beneficios climáticos del uso del GNL como combustible de transporte marítimo. La gravedad del deslizamiento de metano depende en gran medida del diseño del motor utilizado, con motores de alta presión se producen menos emisiones de metano que los modelos de baja presión. Otras cuestiones que reducen aún más los beneficios del GNL como combustible de transporte marítimo se refieren a la evidencia reciente de las fugas de metano en la cadena *Well-to-Wake* que podrían ser mayores de lo esperado previamente.

En conjunto, estos factores hacen que el ciclo de vida y las emisiones de GEI del GNL sean en muchos casos peores que los combustibles marítimos convencionales [24]. Estas consideraciones indican que el GNL enfrenta desafíos para mitigar las emisiones de GEI en el transporte marítimo. Para mejorar el rendimiento es necesario cambiar a tecnologías que reduzcan al mínimo las emisiones de metano tanto en los motores como en la cadena de suministro de combustible.

### **Metanol.**

El metanol, una mercancía ampliamente comercializada, es otro combustible propuesto para contribuir a la descarbonización de la industria naviera. Es un combustible líquido a temperatura ambiente, se puede utilizar con los motores de buques existentes y la infraestructura de bunkering con modificaciones relativamente menores y es más fácil de manejar que los combustibles gaseosos como el GNL. Es miscible en agua y menos peligroso para el medio ambiente que el diésel o el fuelóleo pesado, y se biodegrada rápidamente en caso de derrame. Cuando se quema, el metanol

produce menos contaminantes atmosféricos que el HFO, con un 99% menos de SO<sub>x</sub>, un 60% menos de NO<sub>x</sub> y un 95% menos de partículas.

El metanol está disponible a través de la infraestructura existente en más de 100 puertos de todo el mundo. Estas características la convirtieron en un candidato potencial para cumplir los requisitos políticos establecidos para las zonas ECA del Mar Báltico y del Mar del Norte en materia de contaminación local.

Sin embargo, la mayor parte de la producción actual de metanol procede del gas natural y del carbón. Esto significa que el proceso del ciclo de vida de este combustible conduce a una intensidad de GEI significativamente peor que el HFO en las condiciones actuales. [24] Las emisiones que se producen en la fase de producción de combustible pueden reducirse teóricamente con tecnologías de captura, utilización y almacenamiento del carbono. Sin embargo, la combustión de metanol en los motores de los buques siempre producirá CO<sub>2</sub>, lo que significa que las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono por sí solas no bastarán para lograr grandes reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero del metanol producido a partir de combustibles fósiles. Una alternativa es producir metanol utilizando biomasa y residuos para mejorar significativamente su intensidad de emisión de GEI. El metanol producido de esta manera se considera un biocombustible. También podría producirse teóricamente a partir del hidrógeno y del CO<sub>2</sub> residual, lo que se discute en un marco más amplio sobre los combustibles sintéticos.

### **Biocombustibles.**

Los biocombustibles son combustibles gaseosos o líquidos que dependen de la biomasa como materia prima principal. Los biocombustibles gaseosos, también conocidos como biogás, se producen principalmente a partir de la digestión anaeróbica de biomasa y desechos de la agricultura y la ganadería y se utilizan principalmente para generar electricidad y calor [24]. El biogás puede transformarse en biometano y sustituir los combustibles fósiles para el transporte. Si se produce a partir de residuos y se licúa, puede mezclarse con GNL, reduciendo así su contenido de carbono.

Los biocombustibles líquidos tienen la ventaja de requerir ajustes relativamente menores en la infraestructura de distribución de combustible ya existente. Esto es especialmente cierto en el caso de los biocombustibles que pueden mezclarse directamente con sus homólogos derivados del petróleo, conocidos como biocombustibles de bajo consumo, y pueden tener importantes ventajas en términos de reducción de costes.

En la actualidad, los biocombustibles líquidos consisten principalmente en etanol producido a partir de azúcares vegetales, almidones y otros tipos de biomasa y biodiésel derivado principalmente de aceites vegetales, como la palma, la soja y la colza, ya sea en su forma virgen o reciclada (las grasas animales y otros aceites usados también pueden complementarlas). En conjunto, estas formas de biocombustibles líquidos representaron el 91% de la producción mundial de biocombustibles en 2018. Sin embargo, sólo una parte insignificante de estos combustibles se utiliza en el transporte marítimo.

## Electricidad

La electrificación parcial con sistemas híbridos de transmisión eléctrica puede mejorar la eficiencia operativa de un buque. La eficiencia energética de un motor de combustión interna varía en función de la velocidad o de la carga del motor. Por lo tanto, la variabilidad de las cargas de los motores, para atender por ejemplo, a las necesidades de maniobra, constituye una fuente de ineficacia. Los motores eléctricos híbridos pueden utilizarse para cargar y descargar una batería y mantener los motores de combustión interna funcionando en condiciones óptimas de eficiencia energética. La integración de la electrificación en los trenes motrices puede producir beneficios de eficiencia similares con otras tecnologías de combustible.

Las pilas de combustible también funcionan de manera ineficiente fuera de las condiciones óptimas de diseño.

Con baterías suficientemente grandes, la electricidad puede suministrar una mayor proporción de las necesidades de propulsión, y es factible realizar partes de un viaje sin el trabajo de un motor de combustión interna. Esto puede permitir la propulsión totalmente eléctrica cerca de las zonas costeras y reducir así las emisiones locales de contaminantes atmosféricos. Además, las baterías pueden cargarse utilizando la energía de las redes eléctricas terrestres en lugar de utilizar exclusivamente la energía de un motor de combustión interna. Si la intensidad de carbono de la electricidad de la red eléctrica es inferior a 500 g de CO<sub>2</sub>/kWh, las emisiones well-to-wake serán inferiores a las de HFO.

Actualmente, las baterías eléctricas para aplicaciones marinas cuestan considerablemente más que las producidas para el sector automovilístico. Esto se debe probablemente a la reducción de las posibilidades de producción en masa y de integración en los buques. A medida que aumente la producción de baterías en los vehículos de carretera, se espera que los costes disminuyan. Es probable que esto dé lugar a efectos colaterales positivos en el caso de las baterías adecuadas para los buques, a pesar de que subsiste un vacío debido al aumento de los costes de instalación.

El uso de electricidad generada exclusivamente a partir de fuentes renovables haría de la electricidad un combustible de transporte sin emisiones de carbono, lo que significa que la energía en tierra probablemente reducirá las emisiones de GEI.

### 4.5.1.1. El hidrógeno como vector energético.

El hidrógeno molecular (H<sub>2</sub>) es un combustible que al combinarse con el oxígeno genera una gran cantidad de energía (120 MJ/kg) y agua como residuo. Sin embargo, no existen yacimientos de hidrógeno en nuestro planeta [25]. Por tanto, es necesario extraerlo de otros compuestos, empleando una cierta cantidad de energía para ello.

La idea de usar el hidrógeno como vector energético se basa en un ciclo conceptualmente muy sencillo, es necesario emplear energía (la energía que se desea almacenar, proveniente de los excedentes de producción de centrales renovables) para descomponer las moléculas de agua, generando así oxígeno e hidrógeno, de acuerdo con la reacción:  $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ . [25] De esta

manera, una parte de la energía empleada queda almacenada en los nuevos enlaces químicos formados. Una vez separados estos dos gases, el oxígeno puede enviarse directamente a la atmósfera, mientras que el hidrógeno debe almacenarse adecuadamente para su posterior transporte y/o uso.

El hidrógeno es un vector energético de creciente interés para el transporte marítimo. Una vez que se ha producido a un alto nivel de pureza, puede utilizarse como combustible en las células para producir electricidad y proporcionar tracción mecánica a través de un motor eléctrico. El hidrógeno también puede emplearse en un motor de combustión interna, tanto puro como en una mezcla de combustible dual con combustibles diésel convencionales [24].

Sin embargo, el hidrógeno no está exento de desventajas. El hidrógeno comprimido tiene una densidad energética relativamente baja. Para aumentar su densidad de almacenamiento de energía debe licuarse, lo que provoca pérdidas energéticas de aproximadamente un 30% y tiene un impacto significativo en los costes. El hidrógeno líquido debe almacenarse criogénicamente a  $-252^{\circ}\text{C}$  y requiere una manipulación cuidadosa, ya que es explosivo y penetra en materiales que los hacen frágiles y propensos a fallar.

El hidrógeno puro tiene bajas emisiones de contaminantes atmosféricos, sin óxido de azufre (SOx) ni partículas. La utilización de hidrógeno en combinación con combustibles diésel convencionales en un motor de combustible dual puede producir importantes emisiones de NOx y debe tratarse con sistemas de reducción catalítica selectiva. Cuando el hidrógeno se quema en un motor o se utiliza en una pila de combustible, no produce emisiones de dióxido de carbono, sólo emisiones de NOx, ya que dependen de la temperatura de combustión, y no del combustible. Sin embargo, la producción de hidrógeno puede liberar emisiones de GEI en función de la energía primaria y de la vía de producción utilizada.

Los combustibles fósiles se utilizan para producir la mayor parte de la demanda mundial actual de hidrógeno, ya sea mediante el reformado de metano a vapor (76%) o el reformado de carbón (23%). La producción de hidrógeno mediante el reformado de combustibles fósiles produce emisiones de CO<sub>2</sub>.

Tres soluciones prometedoras para reducir las emisiones de la producción de hidrógeno incluyen:

- La electrólisis del agua con electricidad renovable;
- La aplicación de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono a los métodos de producción fósiles existentes o,
- La pirólisis<sup>9</sup> del metano.

---

<sup>9</sup> La pirólisis (del griego piro, 'fuego' y lisis, 'rotura') es la descomposición química de materia orgánica y todo tipo de materiales, excepto metales y vidrios, causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno. Disponible en: < <https://es.wikipedia.org/wiki/Pir%C3%B3lisis>>



La producción de hidrógeno mediante electrólisis y la utilización de electricidad a partir de fuentes renovables tienen el potencial de eliminar casi todas las emisiones de gases de efecto invernadero producidos por hidrógeno. El hidrógeno procedente de la electrólisis ya está en un alto nivel de madurez tecnológica, pero actualmente se enfrenta a obstáculos debido a unos costes más elevados que los principales métodos de producción utilizados.

La intensidad de carbono del hidrógeno producido por el reformado de combustibles fósiles podría reducirse teóricamente mediante la captura y almacenamiento de carbono para capturar hasta el 90% de las emisiones de CO<sub>2</sub> del proceso. Sin embargo, a menos que también se aborden las emisiones fugitivas relacionadas con la extracción de combustibles fósiles, la aplicación de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono a la producción de hidrógeno a partir de combustibles fósiles solo reduciría la intensidad de las emisiones de GEI durante el ciclo de vida en un 60-70%.

La producción de hidrógeno a partir de la pirólisis del metano implica la descomposición anaeróbica del gas natural a altas temperaturas o en presencia de un catalizador, produciendo hidrógeno y carbono sólido. Como no se produce CO<sub>2</sub> gaseoso en este proceso, el hidrógeno producido de esta manera facilita el almacenamiento de carbono. La pirólisis de metano se utiliza actualmente para producir carbono negro, un material utilizado para reforzar los neumáticos de los vehículos. Sin embargo, como método de producción de hidrógeno, actualmente se encuentra en un nivel relativamente temprano de preparación tecnológica [24].

En teoría, la pirólisis del metano podría reducir la intensidad de GEI del hidrógeno en aproximadamente un 90% en comparación con los métodos existentes de reformado del metano a vapor, siempre que se utilicen fuentes con bajas emisiones de carbono para el calor y el transporte de gas natural. Esta vía también seguirá siendo susceptible a emisiones fugitivas de metano en las cadenas de suministro: a menos que se aborden de manera efectiva, éstas reducen sus beneficios climáticos.

### **Hidrocarburos sintéticos, incluidos los electrocombustibles.**

La combinación de hidrógeno y carbono puede producir una gama de diferentes combustibles de hidrocarburos sintéticos. Se trata de estados gaseosos (por ejemplo, metano) o líquidos (por ejemplo, metanol, gasolina y gasóleo). En los casos en que el hidrógeno se deriva de la electrólisis del agua, estos hidrocarburos sintéticos se clasifican como electrocombustibles. Como todos los combustibles sintéticos, los electrocombustibles pueden diseñarse para mezclarse directamente con combustibles derivados del petróleo o como sustituto, lo que significa que existen relativamente pocos obstáculos técnicos para su utilización en motores de combustión destinados al transporte marítimo.

La intensidad de carbono de los hidrocarburos sintéticos (incluidos los electrocombustibles) depende de las emisiones netas de GEI asociadas con el hidrógeno y los reactivos a base de carbono.

Los reactivos a base de carbono con bajas intensidades de emisiones de GEI se originan en la biomasa (como las vías de la biomasa a los líquidos, examinadas antes en los biocombustibles), pero

también podrían incluir la captura directa de CO<sub>2</sub> en el aire. Los procesos de captura directa de aire implican la separación del CO<sub>2</sub> atmosférico utilizando aminas y calor a baja temperatura. Los combustibles sintéticos producidos utilizando tanto hidrógeno de baja emisión de carbono como insumos de carbono pueden tener una baja intensidad de emisiones de GEI, ya que la mayor parte del CO<sub>2</sub> producido durante su utilización (por ejemplo, en un motor de un buque) queda compensado por el efecto de sumidero de carbono de los reactivos (por ejemplo, la biomasa). Este ciclo del carbono de ciclo cerrado es esencial si se quiere que los combustibles sintéticos conduzcan a una reducción significativa de las emisiones de GEI.

Entre las fuentes alternativas de reactivos de carbono figuran las procedentes de la industria o de la generación de energía mediante la captura de carbono de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Los combustibles sintéticos producidos con esas materias primas contribuirían en forma neta a las emisiones mundiales de GEI cuando se utilizan en el transporte marítimo, pero podrían tener un impacto menor que si se siguiera utilizando HFO.

La producción de hidrocarburos a partir de carbono biogénico se produce a costa de mayores pérdidas termodinámicas y, por lo tanto, es perjudicial desde el punto de vista de un uso eficiente de la electricidad renovable.

### **Amoníaco**

El amoníaco se considera cada vez más un combustible marino con bajas emisiones de GEI. Al igual que el hidrógeno, no produce emisiones directas de CO<sub>2</sub> cuando se quema en un motor. Además, el amoníaco presenta varias ventajas frente al hidrógeno puro: puede almacenarse como líquido enfriándose a -33°C a presión ambiente o presurizando a 10 *bar* a temperatura ambiente, tiene una densidad energética superior al hidrógeno, no es explosivo y puede utilizar tanques de almacenamiento similares a los utilizados para el gas licuado de petróleo. Además, el amoníaco ya es un producto comercializado internacionalmente con procedimientos de manipulación establecidos.

La combustión de amoníaco puro en un motor de encendido por compresión es un reto, ya que se requieren altas relaciones de compresión para encender el combustible [24]. Para superar esta limitación, se necesita un combustible piloto con una temperatura de ignición más baja, como el diésel, para facilitar la combustión, pero esto limitaría las posibilidades de lograr plenamente cero emisiones de GEI. Sin embargo, podría resolverse utilizando un combustible piloto de baja intensidad de carbono, como el hidrógeno, los biocarburos o los combustibles sintéticos.

El uso de amoníaco como combustible marítimo se encuentra actualmente en una etapa temprana de madurez tecnológica con varias pruebas a escala de laboratorio. Podría utilizarse en una pila de combustible como alternativa a un motor de combustión interna. Si se usa en una celda de combustible de óxido sólido, teóricamente se podrían obtener eficiencias del orden del 50% -65% [24]. Por otra parte, el amoníaco podría usarse en una turbina de gas o vapor, pero probablemente tendría una eficiencia térmica muy baja.

El método más común para producir amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) es el proceso Haber-Bosch, en el que se combina Nitrógeno puro obtenido por separación de aire con hidrógeno en presencia de un catalizador. En la actualidad, el 72% de la producción mundial de amoníaco utiliza hidrógeno producido a partir del reformado de metano con vapor de gas natural y el 22% utiliza carbón, principalmente en China. Actualmente hay dos plantas piloto que prueban conceptos de conversión de energía en amoníaco en Oxfordshire (Reino Unido) y Minnesota (Estados Unidos) y reportan eficiencias de producción del 50% -60%. El amoníaco se puede producir por medios alternativos al proceso de Haber-Bosch mediante reacciones electroquímicas, pero estos métodos aún se encuentran en etapas iniciales de investigación.

La intensidad de carbono de la ruta de producción de hidrógeno es crucial para determinar las emisiones de GEI del ciclo de vida de la producción de amoníaco resultante. De manera similar, la intensidad energética de las producciones de amoníaco depende en gran medida de la vía de producción de hidrógeno y de las características de eficiencia energética de los siguientes pasos de conversión.

El amoníaco produce emisiones de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) cuando se quema. Los  $\text{NO}_x$  son contaminantes atmosféricos locales y el  $\text{N}_2\text{O}$  tiene un alto potencial de calentamiento ( $GWP_{100}=265$ ) y podría tener efectos perjudiciales para el medio ambiente si se libera a la atmósfera. En teoría, los reactores catalíticos selectivos se pueden usar para eliminar estas emisiones de óxido de los gases de escape, usando amoníaco en el proceso, pero estas tecnologías deben demostrarse a escala industrial en entornos marinos y deberían ser altamente efectivas.

Un desafío adicional con el amoníaco es que es un químico tóxico, cáustico tanto para los humanos como para la vida marina, lo que significa que se deben adoptar medidas de seguridad significativas. Si bien muchas de estas medidas ya están establecidas para hacer frente al uso actual de amoníaco como fertilizante, serán necesarias consideraciones de seguridad adicionales para quemar amoníaco como combustible, como el uso de tuberías de doble pared en los motores para proteger contra fugas. Ya existen pautas establecidas para el transporte de amoníaco como carga en barcos y el amoníaco también se usa como refrigerante industrial.

#### **4.5.2. ¿Cuál podría ser el mejor combustible para la descarbonización del transporte marítimo?**

El número de opciones de combustibles sostenibles para el transporte marítimo puede reducirse teniendo en cuenta, en primer lugar, su densidad energética. Los combustibles derivados del petróleo, que hoy representan la mayor parte del consumo energético del transporte marítimo, tienen la ventaja de tener una elevada densidad energética, ya que se liberan 33 MJ de energía por litro de combustible quemado. Ver la Figura 12. Casi todos los combustibles alternativos propuestos hasta la fecha para reducir los contaminantes atmosféricos y las emisiones de gases de efecto invernadero tienen una menor densidad energética. Esto significa que para los buques grandes será

inevitable contar con depósitos de almacenamiento de combustible más grandes, lo que puede reducir el espacio para la carga o limitar el alcance de los distintos combustibles.

La solución de almacenamiento de energía con menor densidad energética son las baterías de iones de litio (Li-ion) de los buques eléctricos, que tienen dos órdenes de magnitud menos densidad energética que el HFO, lo que explica incluso la mayor eficiencia de los motores eléctricos con respecto a los motores de combustión. Esta baja densidad energética limita los barcos que funcionan exclusivamente con electricidad a rutas cortas (<200 km). Aunque son numerosas, sólo representan una pequeña fracción de las emisiones marítimas mundiales de GEI.

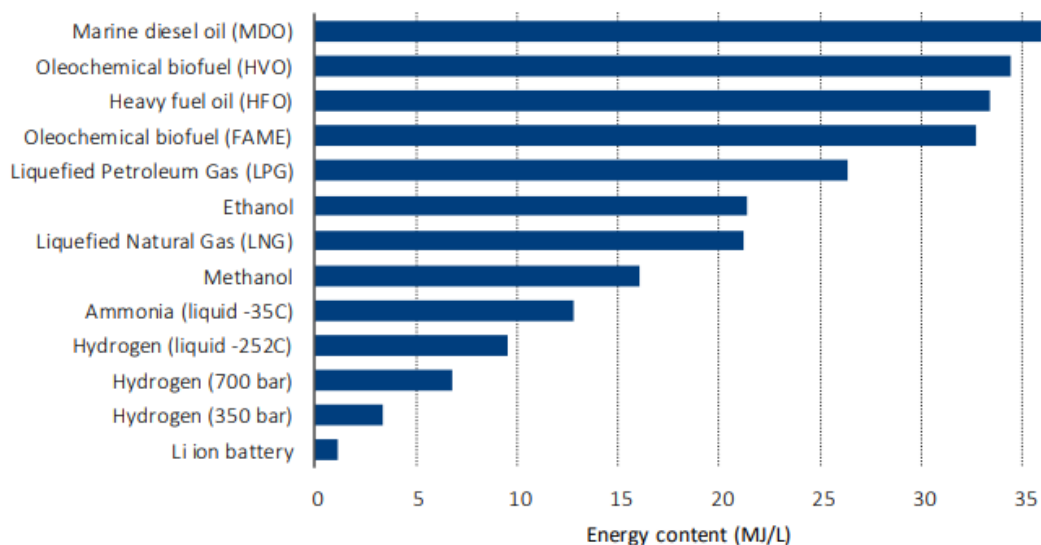


Figura 12: Densidad energética para diferentes opciones de combustibles. Fuente [24]

Una de las principales motivaciones para cambiar de combustibles es la reducción de las emisiones de GEI. La intensidad de GEI de los combustibles es, por tanto, un factor importante a la hora de evaluar la viabilidad de las diferentes opciones de combustible. Para evaluar las emisiones de GEI, la mejor manera de comparar los combustibles sobre la base del ciclo de vida o según la cadena well-to-wake.

En la Tabla 5 se muestran las estimaciones de emisiones asociadas al ciclo de vida de los combustibles, así como el costo de su utilización. Analizando estos datos se puede deducir que:

- La electricidad generada a partir del uso de las baterías puede ofrecer una opción con bajas emisiones de carbono en comparación con los combustibles fósiles alternativos. El uso de las baterías para la propulsión en el transporte marítimo está limitado principalmente por su densidad energética. La densidad energética y la tecnología de las baterías han mejorado en los últimos años, aunque para suplir las necesidades energéticas globales de los viajes a larga distancia para el transporte internacional, el uso de las baterías es improbable.

Fuels	Environmental impacts				Efficiency (at shaft)	Capital cost (including required changes to ancillary onboard systems e.g. fuel supply)	Current cost (per GJ fuel)*	Current cost vs HFO market price (per GJ fuel)*	Potential for cost reduction vs current cost	
	GHG (well-to- wake emissions)	NOx	SOx	PM						
LNG	up to 15 %	~-80 %	~-100%	~-100%	~47%	Estimated ~190 USD/kW (2019)	7-10 USD	7-10 USD	low	
LPG (propane & butane)	17%	-20%	-90%	-90%	~55%	Estimated ~300-400 USD/kW	~10 USD (2019)	Approx. equivalent	low	
Methanol	85% to 91 % (2018)	-60%	-99%	-95%	55%	Estimated ~320 USD/kW (2015)	22 – 35 USD	Additional 9 –28 USD*	Medium	
Biofuel	Pyrolysis fueloil	77% to 80% (2015)	Uncertain, depends on fuel properties	Up to 100% (low sulphur in feedstock)	~0%	--	--	31-45 USD	Additional 18-39 USD*	Up to 36 %
	Waste oils and fats (Feedstock)	53% to 89% (2016)	~0 %	99% to 100 %	Generally reduced	--	--	20-35 USD	Additional 7-29 USD*	low
Battery	-100%	-100%	-100%	-100%	--	--	average: 27 USD (2020)	Additional -6 to 61 USD/GJ *	--	
Hydrogen	-87% Green 20% reduction blue 70% increase grey	**	**	**	40% -50% <55% Internal combustion engine	--	16– 33 USD Green 11-26 USD Grey 13-27 USD Blue	Additional 10 – 21 USD*	High (High cost associated with CCS technology)	
Ammonia	~77% Green ~14% Blue	***	***	***	Not available for combustion engines.	Highly project specific: ~5 million Euros <sup>10</sup>	23– 27 USD Green 16-27 USD Blue	Additional 17-15 USD*	High	

\*Based on HFO market price of 250-500 USD/tonne (2020)  
\*\*If a pilot fuel is used along side H<sub>2</sub> (e.g. MGO) this will lead to CO<sub>2</sub> emissions. NOx cannot be eliminated from ICE but FCs do not produce CO<sub>2</sub>, NOx, SOx or particulate matter emissions.  
\*\*\* Neither combustion of ammonia nor its use in a fuel cell produces CO<sub>2</sub>, so WtW emissions from NH<sub>3</sub> alone will depend on the production pathway for the NH<sub>3</sub> fuel being used. Fuel cells have no emissions except N<sub>2</sub>

**Tabla 5 : Impacto ambiental y costos de los combustibles alternativos. Fuente: elaboración propia a partir de los datos obtenidos en [26]**

<sup>10</sup>Disponible en: [https://nh3fuelassociation.org/wp-content/uploads/2018/12/0900-Ammonia\\_vision\\_vision-ReneRene-Sejer-Laursen-MAN.pdf](https://nh3fuelassociation.org/wp-content/uploads/2018/12/0900-Ammonia_vision_vision-ReneRene-Sejer-Laursen-MAN.pdf)



- Los biocombustibles tienen el potencial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero si se producen mediante procesos avanzados que dependan en gran medida de materias primas de biomasa procedentes de desechos, y que dependan poco de los combustibles fósiles, aunque la oferta puede ser limitada y la demanda probablemente tenga que hacer frente a la competencia de otros sectores y modos de transporte. Empleados como combustibles o mezclados con los combustibles fósiles existentes, tienen un fuerte potencial de utilización con el fin de lograr reducciones netas de emisiones GEI. La medida en que puedan usarse directamente como combustible dependen de la capacidad de mezcla; en general existe incertidumbre y falta de normalización respecto a los límites de mezcla. Otro obstáculo al despliegue a corto plazo son los problemas prácticos que plantea la rectificación de los motores existentes y las adaptaciones a bordo necesarias para el empleo de algunos tipos de biocombustibles. Requieren pocos requisitos de almacenamiento y manejo en el buque; deberían poder almacenarse y manipularse en el mismo almacén y maquinaria que los combustibles destilados marinos convencionales. El corto tiempo de degradación puede ser negativo para el almacenamiento a largo plazo, debido a la producción de sulfuro de hidrógeno corrosivo que puede corroer los tanques de almacenamiento metálicos. La rápida degradación en el agua puede reducir los impactos ambientales de los derrames de petróleo. La oxidación del combustible puede generar pérdida de lubricación, provocando desgastes y requerir aditivos antiestáticos. A medio y largo plazo, el empleo de los biocombustibles dependerá de un apoyo político continuado y de la reducción de costos de las conversiones de los aceites y de la pirólisis, así como de aumentar el acceso a materias primas sostenibles.
- El hidrógeno, el amoníaco y los hidrocarburos/electrocombustibles sintéticos también ofrecen alternativas con bajas emisiones de carbono si se producen utilizando electricidad renovable, con captura de carbono y almacenamiento de recursos energéticos fósiles o con formas renovables de carbono (a partir de la biomasa o la captación directa del aire).
- Por lo tanto, la sustitución de HFO por hidrógeno, amoníaco o electrocombustibles (incluido el metanol) producidos por reformado de metano a vapor sin captura y almacenamiento de carbono conduciría a aumentos significativos de las emisiones de GEI.
- Para el hidrógeno no existe en la actualidad una infraestructura de aprovisionamiento en los buques y el aprovisionamiento depende del método de almacenamiento del combustible. Los costes están dominados por el coste de la fuente de energía primaria y de la tecnología de captura y almacenamiento del carbono. Las pilas de combustibles tienen mayor eficiencia, pueden tener cero emisiones, no emiten NOx y generan menos ruidos y vibraciones.
- El amoníaco se maneja actualmente como sustancia de carga con regulaciones y directrices reconocidas, pero limitado despliegue como combustible para uso marítimo. La infraestructura y equipamiento en tierra necesita ampliarse y extenderse a nuevos emplazamientos para el almacenamiento y transporte. No existe en los buques la

infraestructura de aprovisionamiento ni sus regulaciones. La seguridad es una barrera y los peligros deben mitigarse adecuadamente. La tecnología de las pilas de combustible y el craqueo del amoníaco para producir hidrógeno requieren más investigación y desarrollo.

- El GNL fósil tiene un potencial limitado para reducir las emisiones de GEI debido al deslizamiento y fugas de metano. El deslizamiento de metano sigue siendo relevante para el biometano, a pesar de su importante reducción de emisiones de GEI. A menos que se aborden adecuadamente estos desafíos, es poco probable que el GNL desempeñe un papel en el cumplimiento de los objetivos de mitigación del cambio climático establecidos en el Acuerdo de París y en la estrategia inicial de reducción de las emisiones de GEI de la OMI.
- El GNL es seguro de usar, totalmente compatible y fácilmente disponible como combustible para el transporte marítimo. Posibilidad de reconversión de los motores existentes, y la disponibilidad de motores Dual-Fuel existentes ya en el mercado está aumentando. Se entiende bien la infraestructura y el equipamiento en tierra para el almacenamiento y transporte del GNL. Es menos costoso que el MGO y el HFO, aunque una menor densidad energética volumétrica requieren más espacio en los tanques de combustibles. Tiene una combustión limpia, hasta un 20% menos que HFO/MGO, sin embargo el metano puede compensar este beneficio de forma negativa.

En teoría, un cambio a versiones fósiles del hidrógeno, el amoníaco, el metanol y el GNL podría proporcionar la infraestructura necesaria para permitir la transición a versiones con bajas emisiones de carbono de estos vectores energéticos. Sin embargo, sus malos resultados cuando se producen a partir de recursos fósiles y la falta de captura y almacenamiento de carbono acarrearán riesgos importantes para una vía de descarbonización.

Otros combustibles u opciones energéticas que podrían haberse considerado:

- Etanol: materia prima actualmente más valorada para el transporte por carretera, y restricciones debido a las propiedades del combustible.
- E-diesel: Alto costo.
- Nuclear: Las preocupaciones sobre la seguridad, los costos y los desafíos políticos limitan la aplicabilidad.

Al seleccionar el mejor combustible para la descarbonización del transporte marítimo deberían tenerse en cuenta aspectos fundamentales, tales como:

- La disponibilidad de la materia prima y la infraestructura de producción del combustible.
- La densidad energética para los requerimientos del espacio de almacenamiento del combustible.
- La existencia de los estándares y las certificaciones.
- La aplicabilidad en la flota existente y la infraestructura para el bunkering.



- Los aspectos económicos relacionados con el costo del combustible, el bunkering y las modificaciones de los buques.
- La sostenibilidad global asociada a las emisiones directas e indirectas de GEI.
- La madurez tecnológica en cuanto a la producción y el uso.
- La seguridad en las operaciones y la toxicidad.
- La sostenibilidad local teniendo en cuenta la contaminación del aire por las emisiones y el impacto en las aguas.

### 4.5.3. Reducción de la velocidad: alternativa inmediata para reducir las emisiones de GEI.

Se reconoce comúnmente que la reducción de la velocidad es el medio más inmediato para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector del transporte marítimo. En el segundo estudio de la OMI sobre los gases de efecto invernadero (2009), se incluía la reducción de la velocidad como un factor entre todas las posibilidades de reducción de emisiones hasta el año 2050. La reducción de la velocidad ya se está implantando en el sector para reducir costos (y a causa del exceso de capacidad) durante la recesión económica.

La reducción de la velocidad para travesías cercanas a tierra y para la navegación de cabotaje también produciría indudables beneficios para la salud humana, la calidad del aire y el medio ambiente como resultado de la reducción de emisiones de GEI.

El objetivo de optimizar la velocidad de navegación de los buques es comparable al objetivo de optimización del casco. Al optimizar la velocidad del buque, se reduce la fricción con el agua. En este momento, los buques actuales están diseñados en su mayoría para operar dentro de la zona de velocidad límite. Esta es una zona donde el coeficiente de resistencia a la velocidad comienza a aumentar dramáticamente a medida que aumenta la velocidad. [27]

La relación entre la potencia ( $P$ ) y la velocidad ( $V$ ) viene dada por:

$$P \sim V^{2,7} \tag{8}$$

Una mayor velocidad de navegación, también significa un mayor requerimiento de potencia. Cuando se necesita más energía, el consumo de combustible aumentará, así como las emisiones de carbono relacionadas con este incremento.

En la Figura 13 se puede observar la relación entre el coste por tonelada y el consumo de combustible por tonelada, y la relación entre el coste por tonelada transportada y la velocidad del buque, para los diferentes costes de combustible. El gráfico muestra que la velocidad del buque correspondiente al menor consumo de combustible es inferior a la de mejor solución económica. Sin embargo, la velocidad óptima no es igual a la velocidad más baja posible, por lo que debe llevarse a cabo un proceso de optimización para cada buque a fin de determinar la velocidad que

corresponde al menor consumo de combustible. El gráfico deja claro que existe una discrepancia entre la velocidad óptima de navegación climática y económica. Sin embargo, cuando el costo del combustible se incrementa, los dos óptimos tienden a acercarse.

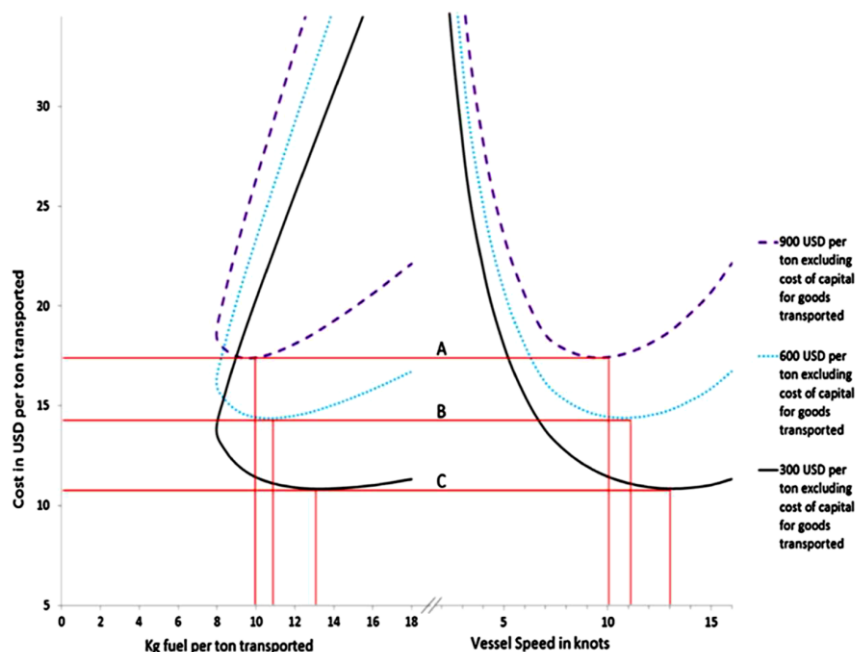


Figura 13: Combustible y coste por tonelada transportada en función de la velocidad y el coste del combustible para un Aframax estándar. Fuente: [27]

El análisis realizado por CE Delft en el documento *ISWG-GHG 2/2/16* [28], se calcula que una reducción de la velocidad del 10% haría disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> de los buques portacontenedores, petroleros y graneleros un 13%, un 10% y un 15%, respectivamente. Una reducción de la velocidad del 20% haría disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> de los buques portacontenedores, petroleros y graneleros un 23%, un 18% y un 28%, respectivamente. Una reducción de la velocidad del 30% haría disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> de los buques portacontenedores, petroleros y graneleros un 32%, un 24% y un 38%, respectivamente.

La aplicación de una reducción de la velocidad del 30% en la flota marítima internacional restante reduciría probablemente las emisiones de estos buques en un 30% como mínimo, incluso cuando se tenga en cuenta la necesidad de utilizar buques adicionales. En ese caso, en la hipótesis de la reducción de la velocidad del 30%, las emisiones del transporte marítimo internacional disminuirían aún más, con lo cual se ahorrarían 4 400 Mt de CO<sub>2</sub> entre 2020 y 2038 de acuerdo con la hipótesis de 2 °C, y 2 300 Mt de CO<sub>2</sub> entre 2020 y 2028 de acuerdo con la hipótesis de 1,5 °C. [28]

Cuanto más se reduzca la velocidad, más disminuirán las emisiones y más fácil será que el sector se ajuste a una trayectoria de descarbonización coherente con un aumento futuro de la temperatura de 1,5°C o 2°C. Además, la implantación de una reducción de la velocidad a corto plazo puede

permitir que el sector del transporte marítimo internacional establezca objetivos de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero muy ambiciosos pero viables.

El estudio de la Junta de Recursos Aéreos de California (CARB, 2009) [10] evaluó el impacto de la reducción de la velocidad de los buques de 22 a 12 nudos. Trata por separado las restricciones de velocidad en la zona de 12 mn, en la zona de 200 mn y alta mar. La reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> se utiliza como indicador indirecto para estimar la reducción del consumo de combustible, lo que se traduce además en posibles ahorros de costes debido a la lentitud del vapor. Los valores de reducción de las emisiones asumidos para las restricciones de velocidad se resumen en la Tabla 6 **Reducción de las emisiones como resultado de las restricciones de velocidad en la zona de 12 mn, en la zona de 200 mn y en alta mar. Fuente [10]**

Zona Marítima	NOx	SOx	PM <sub>2,5</sub>	CO <sub>2</sub>	Aplicado a:
zona 24 mn	-21%	-13%	-18%	-13%	zona 12 mn
zona 40 mn	-36%	-29%	-31%	-29%	(zona 200 mn + alta mar) <sup>11</sup>

**Tabla 6 Reducción de las emisiones como resultado de las restricciones de velocidad en la zona de 12 mn, en la zona de 200 mn y en alta mar. Fuente [10]**

Sin embargo, la reducción de la velocidad operacional tiene diversas limitaciones, por ejemplo, las repercusiones en la seguridad, el tiempo de trabajo y el transporte de mercancías perecederas. Por consiguiente, una mejora de la eficiencia del 40% para el 2030 sigue siendo un objetivo exigente y es necesario contar con otras medidas centradas en la mejora operacional para alcanzarlo.

La OMI debe garantizar que la reducción de la velocidad siga siendo una opción para cumplir los objetivos del EEDI. No obstante, los recortes necesarios en las emisiones de GEI a largo plazo solamente serán posibles mediante una combinación de la reducción de la velocidad y mejoras tecnológicas en la eficiencia de los buques, por lo que los objetivos del EEDI se han de establecer de forma que se garanticen los incentivos adecuados para llevar a cabo las mejoras tecnológicas en el proyecto del buque, así como un incentivo para reducir la velocidad. La reducción de la velocidad, sea mediante velocidades de proyecto inferiores o alguna medida normativa, debería producir, con el tiempo, una reducción en la potencia instalada. Las medidas para mejorar el EEDI son limitadas en el caso de los buques pequeños. Las restricciones de velocidad podrían constituir una opción para dichos buques.

<sup>11</sup> Las divisiones de los mares y océanos de conformidad con la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar.

#### 4.5.4. Mejoras tecnológicas de ahorro de energía.

Las tecnologías innovadoras de eficiencia energética se clasifican en las categorías A, B y C, dependiendo de sus características y efectos en la fórmula del EEDI (ver ecuación 1, sección 3.1.1). Además, las tecnologías innovadoras de eficiencia energética de las categorías B y C incluyen dos subcategorías cada una (categorías B-1 y B-2, y C-1 y C-2, respectivamente). Ver Tabla 7

Tecnologías innovadoras de eficiencia energética.				
Reducción de la potencia del motor principal			Reducción de la potencia auxiliar	
Categoría A	Categoría B-1	Categoría B-2	Categoría C-1	Categoría C-2
No pueden separarse del funcionamiento general del buque	Pueden separarse del funcionamiento general del buque		Eficaz en todo momento	En función del entorno
	$f_{eff} = 1$	$f_{eff} < 1$	$f_{eff} = 1$	$f_{eff} < 1$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revestimientos de baja fricción.</li> <li>• Optimización resistencia del timón</li> <li>• Proyecto de la hélice</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema de lubricación por aire del casco (cavidad de aire mediante inyección para reducir la resistencia del buque) (puede apagarse)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energía eólica (velas, rotores Flettner, cometas)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema de recuperación del calor (recuperación del calor de los gases de escape y conversión a energía eléctrica)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Células fotovoltaicas</li> </ul>

**Tabla 7 Categorías de las tecnologías innovadoras de eficiencia energética. Fuente [29]**

Relación de tecnologías que pueden contribuir al ahorro energético de los buques:

1. Mejoras del diseño.

1.1 Optimización del casco .

Hay muchos obstáculos para centrarse exclusivamente en la modificación de las líneas del casco para lograr una resistencia más favorable. Ejemplos de ello son los efectos de determinados requisitos de cantidad y tipo de carga útil y las dimensiones de los puertos y terminales. Estos obstáculos disminuyen considerablemente las posibilidades de reducción de la resistencia y del consumo de combustible.

La resistencia y el consumo de energía aumentan cuando el casco está en el agua sobre la que hay olas, por lo cual, la optimización para condiciones irregulares de olas se está haciendo más común. Durante su vida útil, los buques operarán con mayor frecuencia en un campo de olas caracterizado por la longitud de onda corta ( $\lambda$ ) (pequeños estados del mar) en comparación con la eslora ( $L$ ). [32]

Hay un ejemplo relacionado con la tecnología para la optimización del casco, conocido como Stern Wedge<sup>12</sup>. La metodología se basa en la evaluación de la solapa de cuña integrada en la popa. Los buques de desplazamiento de alta velocidad operan en una región empinada de la curva velocidad-resistencia, ver la Figura 14, y por lo tanto, el ahorro de energía mediante la reducción de la resistencia desempeña un papel importante en la explotación rentable del buque.



Figura 14: Montaje experimental y vista de fondo de los efectos de la cuña sobre el rendimiento de una embarcación. Fuente [32]

Debe tenerse en cuenta que la optimización del casco se refleja en el  $V_{ref}$  (velocidad) al aumentar el calado en la potencia elegida. Sin embargo, para muchos tipos de buques este proyecto es raramente utilizado. Si se optimizan las líneas del casco a fin de lograr un mejor EEDI, el rendimiento en los proyectos reales puede no ser óptimo.

El efecto de la optimización del casco puede ser limitado por la posible reducción posterior de la capacidad de carga. Esto puede dar lugar a peores mediciones del rendimiento en CO<sub>2</sub> por unidad de transporte. La cuña de popa sólo es relevante para los buques rápidos, ejemplo: los superyates. No obstante, las recientes innovaciones en materia de cascos también permiten reducir (considerablemente) la resistencia del casco, no sólo en condiciones de mar adversas, sino también en condiciones de aguas tranquilas.

### 1.2 Optimización de la superestructura.

La optimización de la superestructura de los buques para reducir la resistencia al aire inmóvil y al viento no ha sido tradicionalmente un tema importante. No obstante, en el caso de los buques con grandes superestructuras y de los buques que operan a velocidades relativamente elevadas, existe la posibilidad de reducir el consumo de energía mediante una racionalización sistemática de la superestructura en la mayor medida posible.

---

<sup>12</sup> Mohammad Aref G, Parviz Ghadimi. The effect of the stern wedge length and height on the drag and trim of a chine-planing hull. [Online] November 2021. Project: Numerical investigation of the effect of a wedge on the stability and hydrodynamics performance of a mono-hull planing vessel. DOI:10.17402/475 [Consultado 15 marzo 2022]. Disponible en: <<[https://www.researchgate.net/publication/355980801\\_The\\_effect\\_of\\_the\\_stern\\_wedge\\_length\\_and\\_height\\_on\\_the\\_drag\\_and\\_trim\\_of\\_a\\_chine-planing\\_hull](https://www.researchgate.net/publication/355980801_The_effect_of_the_stern_wedge_length_and_height_on_the_drag_and_trim_of_a_chine-planing_hull)>>

En el caso de estos buques, se estima que existe un potencial de reducción del consumo de energía del 2 al 5%, dependiendo del tamaño de la superestructura y de la zona en la que opere el buque. Asimismo, en el caso de otros buques, se espera que exista un cierto potencial de reducción del consumo de energía, tal vez del orden del 1-2%, manteniendo las partes superiores lo más limpias y racionalizadas posible. Los esfuerzos para lograr reducciones pueden ir desde los sencillos (por ejemplo, moler perlas de soldadura planas) hasta los más amplios (por ejemplo, rediseñar y reposicionar grúas, aplicar spoilers para alterar el flujo de aire sobre el embudo y las casetas de cubierta, y diseñar casetas de cubierta más racionalizadas). En el caso de la transición al sistema de propulsión eléctrica, que permitirá trasladar la sala de máquinas a la proa, se adoptará una superestructura de racionalización.

Un diseño de spoiler en proa (cubierta) podría ser útil en naves más pequeñas, sin embargo, para los buques cisterna y graneleros esta aplicación es posible, también para los Car Carrier.

### 1.3 Optimización de la hélice.

El principal efecto atenuante de la optimización de la hélice se obtiene aumentando el diámetro de la hélice y reduciendo el número de sus revoluciones por minuto. Las prescripciones relativas al mantenimiento de espacios libres adecuados entre la hélice y el casco y a la inmersión suficiente de la hélice cuando el buque está navegando en una vía marítima o en estado de lastre limitan la medida en que puede aumentarse el diámetro de una hélice.

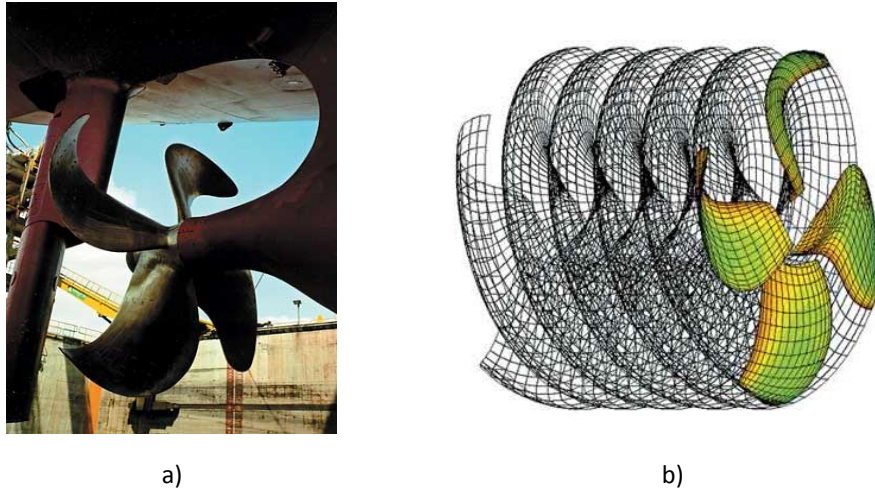
Una hélice que funcione a un número reducido de revoluciones por minuto puede requerir el coste adicional de instalar un reductor, mientras que las hélices que funcionen a un número mayor de revoluciones por minuto generalmente pueden conectarse directamente al motor principal. Por consiguiente, las hélices de gran diámetro, que funcionan a un número reducido de revoluciones por minuto, serán las más adecuadas para los buques de gran calado; esto incluye la mayoría de los petroleros y graneleros y muchos buques de carga general. Esas hélices serán menos adecuadas para muchos buques portacontenedores y, en general, no serán adecuadas para los buques Ro-Pax o los buques de crucero.

El tipo más eficiente de hélice es una de paso fijo bien diseñada. Sin embargo, por otras razones, deben considerarse otros dispositivos de propulsión. Por ejemplo, las hélices de paso controlable, aunque menos eficientes que las de paso fijo, pueden seleccionarse si el buque de que se trate necesita cumplir los requisitos de inversión rápida del empuje o de funcionamiento eficiente en condiciones ambientales considerablemente variables. Por otra parte, para los buques con exigencias de gran maniobrabilidad, las hélices de eje vertical representan una opción preferible.

Hay dos ejemplos relacionados con la tecnología para la optimización de la hélice: la hélice Kappel y la hélice CLT.

Ejemplo 1: Hélice Kappel.

Mientras que las hélices de barcos tradicionales tienen palas modeladas sobre la base de superficies helicoidales, la hélice Kappel tiene puntas de palas modificadas suavemente curvadas hacia el lado de succión de la pala. [33], ver la figura 15.



**Figura 15: Hélice Kappel a): detrás del M/T Nordamerika de Dampskibsselskabet Norden, A/S, 35000 TPM, b): Modelo numérico de elementos de contorno de la hélice. Fuente: DTU Mechanical Engineering.**

Los vórtices de punta se forman debido a la diferencia de presión entre el lado de presión y de succión de la hélice a medida que el agua se mueve de la región de alta presión a la región de baja presión. Por lo tanto, la presión en ambos lados cerca de la punta se igualará y la eficiencia de la región de la punta disminuirá. La hélice Kappel minimiza el caudal sobre la punta, por lo que la región exterior de la hélice Kappel mantiene una alta eficiencia, aumentando de 4-5% la eficiencia total de la hélice en comparación con las hélices convencionales. [33]

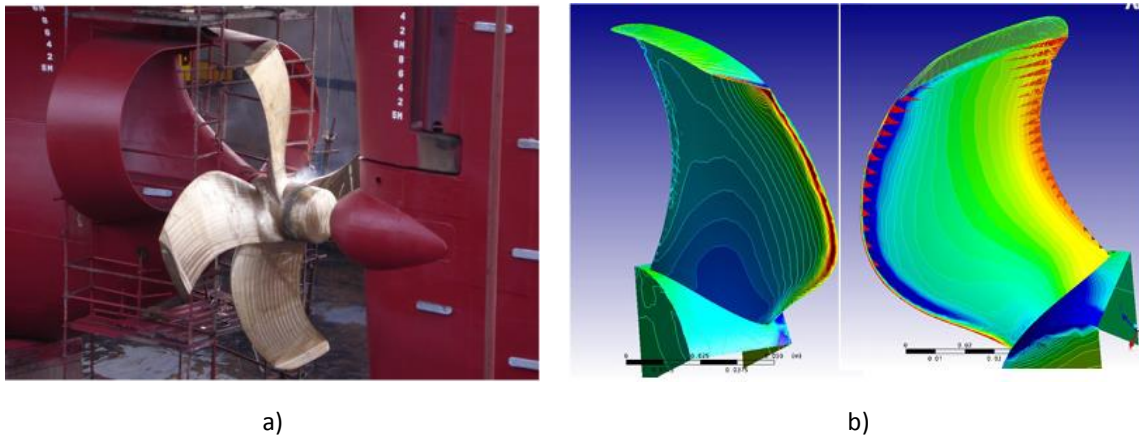
Ejemplo 2 hélice CLT (Contacted Loaded Tip)

Las hélices CLT se caracterizan por lo siguiente:

- La punta de la pala genera un empuje sustancial.
- El paso se incrementa desde la raíz hasta la punta de las palas.
- El acorde en la punta es finito.
- Las placas finales se colocan en las puntas de las palas, hacia el lado de presión; se adaptan a la contracción de la vena fluida para reducir al máximo su resistencia viscosa.

Las placas finales actúan como barrera, evitando la comunicación del agua entre la presión y el lado de succión de las palas, permitiendo establecer una carga finita en la punta de las palas. Ver ejemplo en la figura 16.

El objetivo fundamental de la hélice CLT es mejorar la eficiencia de la hélice en aguas abiertas, reduciendo el ángulo de paso hidrodinámico mediante la reducción de las magnitudes de las velocidades inducidas en el disco de la hélice.



**Figura 16: Hélice CLT, a) la nueva hélice CLT con WED preexistente y timón bulbado, del buque cisterna Roy Maersk, 35000 TPM, y b) distribución de la presión en el lado de las presiones (izquierda) y en el lado de la succión (derecha) de las palas de una hélice CLT. Fuente: [34]**

La caída de presión en el lado de aspiración de las hélices CLT es inferior a la del equivalente convencional, la extensión de la cavitación desarrollada en el lado de aspiración es menor y, por lo tanto, las fuerzas de presión que una hélice CLT ejerce sobre la estructura del casco de popa son menores. Además, las hélices CLT tienen un vórtice de punta reducido debido a la existencia de las placas finales. La combinación de estas circunstancias hace que las fuerzas de presión ejercidas por una hélice CLT sobre la estructura de popa sean inferiores a las de las hélices convencionales, por lo que las vibraciones y los niveles de ruido inducidos a bordo son inferiores. El ruido radiado al agua también es inferior en las hélices CLT.

Las hélices CLT ofrecen una mayor eficiencia respecto a las hélices convencionales entre 5-8% [34] que puede utilizarse para ahorrar combustible a velocidad constante del buque o, alternativamente, aumentar la velocidad del buque con un consumo constante de combustible.

#### 1.4 Propulsor azimutal o Podded (azipod) drives.

El propulsor azimutal es un dispositivo de doble función que consiste en una hélice que puede orientar su impulso girando alrededor de un eje vertical. Estos propulsores pueden girar sin necesidad de una línea de ejes rígida, sino con un motor eléctrico acoplado perpendicularmente al propulsor en un contenedor (pod), que es alimentado por un alternador situado en la cámara de máquinas.

Sólo podría ser eficaz para los buques que cambian frecuentemente de rumbo, como los remolcadores, los buques de suministro y otros buques para el transporte marítimo de corta distancia. No es eficaz para otros tipos de buques.





**Figura 17: El Queen Mary 2 está equipado con cuatro Pod Mermaid, dos fijos situados a proa de los dos pod azimutales que le dan gobierno al buque. Fuente propia.**

## 2. Recuperación de la energía de la hélice.

Se ha inventado un número considerable de dispositivos para mejorar el consumo de energía de los buques recuperando en la mayor medida posible esta energía rotatoria en el flujo de la hélice, o para proporcionar una cierta pre-rotación de la entrada en la hélice. Las más importantes se examinarán a continuación.

### 2.1. Hélice contra-rotativa coaxial.

La hélice contra-rotativa coaxial es un dispositivo para recuperar parte de la energía rotacional. Para evitar problemas con la cavitación, la hélice de popa suele tener un diámetro menor que la hélice delantera, por lo tanto, la hélice de popa no está trabajando en el campo de flujo rotatorio completo de la hélice delantera. [35]

Los sistemas de propulsión contra-rotativa tienen la ventaja hidrodinámica de recuperar parte de la energía rotativa del torbellino que, de otro modo, se perdería en un sistema convencional de un solo eje. En las aplicaciones marinas de propulsión contra-rotativa es normal que la hélice posterior tenga un diámetro menor que la hélice delantera y, de esta manera, tenga en cuenta los efectos de contracción del torbellino. Del mismo modo, los números de hoja de las hélices delanteras y popa suelen ser diferentes; normalmente, cuatro y cinco para las hélices delanteras y popa,

respectivamente. Además, debido a la configuración de las dos hélices, las hélices contra-rotativas tienen la capacidad de equilibrar la reacción de par del propulsor, lo que es importante para los torpedos y otros problemas de propulsión similares. Ver la figura 18.



**Figura 18: Pareja contra-rotativa compuesta por un propulsor convencional y propulsor Podded. Fuente: ABB, [35]**

La complicación del eje da lugar a pérdidas mecánicas que compensan parte de la ganancia que se obtiene al recuperar la energía rotacional. También se conoce que las cajas de cambios para hélices contra-rotativas pueden presentar problemas.

Este sistema es especialmente beneficioso para las hélices de carga relativamente pesada, por ejemplo, para buques con restricciones de calado. Los mejores resultados (en forma de consumo de energía) se han encontrado en los buques de carga rápida, los buques de transbordo rodado y los buques portacontenedores, obteniéndose una ganancia de eficiencia del 5-10%. Naturalmente, este tipo de tecnología se prueba en los casos en que se espera que sea especialmente adecuada. Las solicitudes futuras se verán limitadas debido a que las instalaciones y mantenimientos son complicados y costosos. Los ahorros previstos estarán en el rango 0- 5%. [31]

## 2.2. Rueda de paletas de rotación libre (Free rotating vane wheel).

La rueda de paletas (rueda Grim) es una hélice de rotación libre, instalada detrás de la hélice principal. Consiste en una hélice relativamente pequeña accionada por el mecanismo principal y una hélice de libre rotación montada en el lado inferior, cuya parte interna (detrás de la hélice motorizada) actúa como turbina y la parte externa como hélice. [36] Ver la figura 19:



Figura 19: Rueda de paleta de rotación libre detrás de la hélice principal (2012). Fuente: DNV GL/HHI [37]

Este sistema de propulsión presenta las siguientes ventajas hidrodinámicas respecto al accionamiento normal de una sola hélice [36].

- Recuperación sustancial de la energía rotacional.
- Mayor posible sección transversal a chorro de la rueda de paletas, ya que la baja velocidad de rpm y el gran número de palas permiten aceptar espacios verticales más pequeños.
- Menos resistencia del timón detrás de la rueda de paletas. Esto se refleja en la eficiencia rotativa relativa.
- Mejor capacidad de detención.

Además, la mayor velocidad de rpm asociada al menor diámetro de la hélice impulsada por el motor mejora el peso y el coste de la unidad de propulsión. Se parte del criterio de que la rueda de paletas tiene un diámetro 20% mayor que la hélice accionada mecánicamente.

El sistema parece adecuado para una amplia gama de buques de carga convencionales, pero sólo se ha informado de unas pocas instalaciones reales, es decir, sin experiencia. Este sistema no se ha aplicado recientemente porque podría sufrir daños en alta mar. El ahorro estará relacionado con la carga de la hélice y solo se considera el 10% como un índice máximo de mejora [31]

### 2.3. Hélice con tobera/conducto (Ducted propeller).

La Hélice con tobera (conducto) consiste en una hélice montada centralmente en una lámina en forma de anillo [30]. En comparación con la hélice convencional del mismo diámetro y empuje, esta disposición permite suministrar una mayor masa de agua a la hélice, mejorando las condiciones de funcionamiento alrededor de la hélice y la eficiencia. El conducto genera empuje adicional, aumenta la resistencia, pero con cargas de hélice más elevadas esto se compensa con creces por los efectos positivos de la combinación de hélice y el conducto. Ver la figura 20.



**Figura 20: Hélice con tobera/conducto. Fuente: [38]**

También cabe mencionar que algunos fabricantes de hélices han mejorado la eficiencia de las hélices con tobera mediante una mayor optimización del conducto, de manera que el empuje de la hélice a baja velocidad se ha incrementado entre un 6% y un 8%. Por lo tanto, las hélices por conductos son adecuadas para buques que operan con cargas elevadas de hélice, como buques cisterna, graneleros, remolcadores y diferentes buques de suministro y servicio en alta mar.

Respecto a la aplicación de esta tecnología podemos decir que la relación de mejora depende de las condiciones de carga de empuje. Sólo es útil para los tipos de buques con alta carga de hélice. El potencial de reducción del consumo de energía en los buques se sitúa entre el 5% y el 20%, siendo quizás el 10% un buen valor medio. Se han obtenido buenas experiencias en remolcadores, pero no es aplicable a los portacontenedores. [31]

#### 2.4. Dispositivo pre-rotación (Pre-swirl device)

Se trata de dispositivos que pretenden proporcionar una pre-rotación favorable del flujo de agua delante de la hélice. Incluyen aletas de reacción radial delante de la hélice y una popa asimétrica.

El propósito de un estator pre-rotación delante de una hélice es generar un flujo remolino opuesto al sentido de rotación de la hélice. Las palas de la hélice experimentan este flujo rotatorio como una carga adicional de palas, a través de la cual se eleva el empuje entregado por unidad de potencia. Por supuesto, este aumento del empuje de la hélice debe ser mayor que la resistencia experimentada por el propio estator pre-rotación para lograr una ganancia neta positiva. Desde el punto de vista del balance energético, el ahorro de potencia se explica con la misma facilidad, ya que el objetivo del estator pre-rotación es reducir la energía de rotación cinética en el flujo detrás de la hélice. El estator pre-rotación induce la rotación del caudal aguas abajo, que es absorbida y disminuida en gran medida por la rotación opuesta inducida por la hélice, dejando así menos

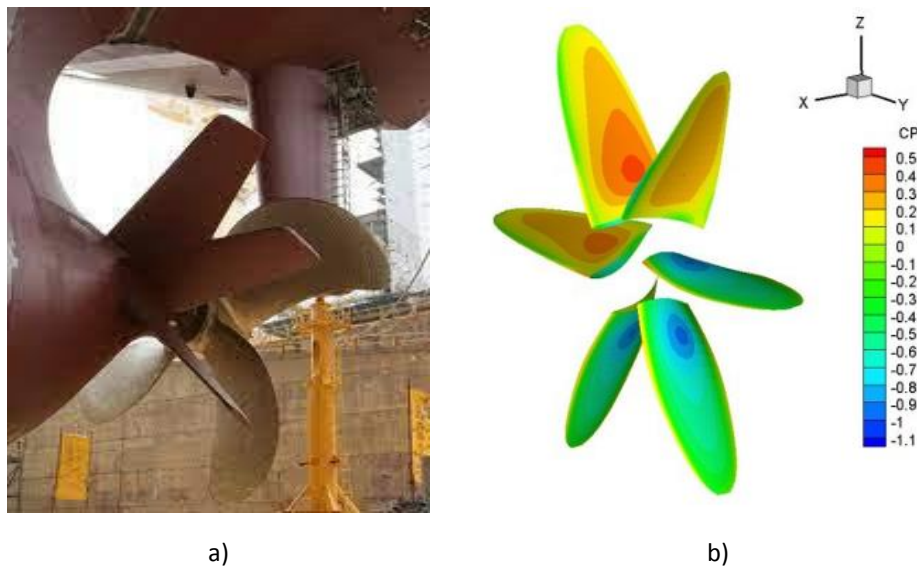
rotación en el torbellino final. Esto se debe a que, en comparación con una sola hélice, el flujo que pasa por el disco de la hélice absorbe menos energía de rotación. [39]

Considerando las aletas de reacción radial, se ha dado una reducción del consumo de energía entre 3% - 8% en ensayos con modelos, mientras que el resultado reportado de un ensayo a gran escala fue de 7% - 8%. Para la popa asimétrica, se han reportado mejoras en el consumo de energía del 1% - 9% en ensayos con modelos. El ratio de mejora varía según el tipo de buque o las características de la hélice, etc. Las aletas de reacción radial o una popa asimétrica deben ser aplicables a todos los buques de un solo eje, y deben funcionar según las expectativas en muchos casos. Cabe señalar que en varios casos los beneficios previstos no se han demostrado en la operación a gran escala, y se han presentado daños estructurales asociados a este dispositivo. [30][31]

Existen dos ejemplos relacionados con los dispositivos de pre-rotación: las paletas guía delante de la hélice y el conducto de nivelación integrado.

#### Ejemplo 1: Paletas guía delante de la hélice.

El objetivo de las paletas guía es eliminar o reducir el flujo cruzado que a menudo se observa delante de la hélice. Estas paletas se colocan delante de la hélice en ambos lados del poste de popa; ver la figura 21. Las paletas enderezan el flujo en la capa límite delante de la hélice, mejorando así su eficiencia. El flujo cruzado aparece sobre todo en buques que funcionan a una velocidad relativamente baja, por lo tanto, el beneficio es mayor para los petroleros y graneleros. La mejora disminuye con la forma decreciente del casco.



**Figura 21: Dispositivo pre-rotación a) de paletas guías, b) Ilustración de la distribución de la presión, tres palas que muestran el lado de la presión y tres palas que muestran la distribución del lado de la succión.**  
Fuente: [39]

Ejemplo 2: Conducto pre-rotación (de medio anillo) integrado.

El conducto de nivelación consiste en un conducto de medio anillo con secciones tipo lámina unidas a cada lado del cuerpo posterior, delante de la hélice, ver la figura 22. Este conducto de medio anillo acelera el flujo hacia la hélice en el cuadrante superior a cada lado y retarda el flujo en los cuadrantes inferiores, dando lugar a un campo de estela más homogéneo delante de la hélice, mientras que la estela media se mantiene casi inalterada. El consumo de energía mejorado que se obtiene de este dispositivo bien diseñado se debe fundamentalmente a:

- Una mayor eficiencia gracias a un mayor caudal axial y a un campo de estela más homogéneo;
- Resistencia reducida debido a la reducción de la separación de flujo en el cuerpo posterior;
- La orientación de los ejes de los conductos de manera que la entrada a la hélice recibe una pequeña pre-rotación; y
- La mejora de la dirección, debido al flujo enderezado sobre el timón y a la zona lateral de popa.



**Figura 22: a) Sistema Pre-swirl probado en el Car and Truck Carrier Grande Portugallo, de Grimaldi Lines. Fuente: MarineLog. b) distribución de las líneas de flujo en la hélice y conducto de medio anillo con aleta central. Fuente: Hyundai Heavy Industries [40]**

### 2.5. Dispositivos de giro posterior (Post-swirl devices)

Varios dispositivos pertenecen a esta categoría. Algunos implican modificaciones al timón. Los más importantes entre estos dispositivos pueden ser aletas de empuje adicionales en el timón, sistemas de timón con bulbo y con aletas, aletas en el casquete de hélice (aletas en la tapa principal) y un timón asimétrico, ver la figura 23. Para estos dispositivos, se han reportado mejoras en el consumo de energía del 1-8% a partir de ensayos en modelos. En mediciones a escala completa, se ha obtenido una mejora del 8-9% para aletas de empuje adicionales en el timón, mientras que se ha reportado una mejora del 4% para aletas de tapa principal. [31]

El efecto de estos dispositivos ha sido razonablemente bueno en ensayos de modelos y en ensayos a gran escala. Puede considerarse una mejora del 5% en el consumo de energía. Para el caso del timón con bulbo asimétrico se han visto ahorros de 2-4%. Los dispositivos son aplicables a los buques de carga general, los buques RoPax y los buques portacontenedores que operan a gran velocidad. [30][31]

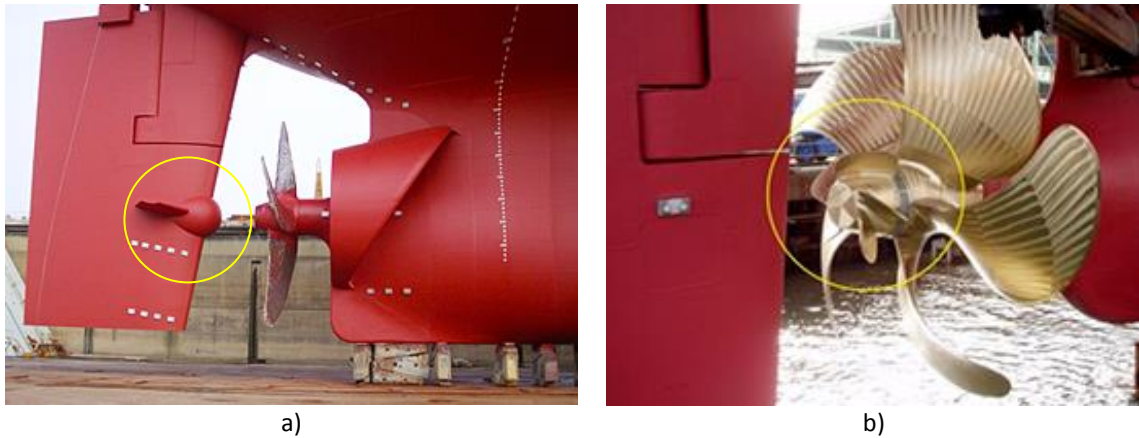


Figura 23: Dispositivos de giro posterior. a) Timón con bulbo y aleta, b) Sistema de aletas del casquete de hélice. Fuente: JMUC [41]

## 2.6. Gate Rudder System (Timón de compuertas)

El sistema Gate Rudder es un innovador dispositivo de maniobra y ahorro de energía con un diseño único formado por dos láminas a cada lado de la hélice. Consiste en dos timones de forma de láminas colocadas en paralelo a ambos lados de la hélice en lugar de colocarse detrás de la hélice, lo que reduce la resistencia del timón y crea empuje para ahorrar hasta un 14% en el consumo de combustible. Ver la figura 24.



Figura 24: Timón de compuertas. Fuente: Wartsila [42]

Durante la trayectoria, el rendimiento de empuje resultante aumenta debido a los efectos hidrodinámicos beneficiosos de la hélice y el sistema de dirección. A diferencia de una disposición

de timón tradicional, las compuertas del timón pueden rotar su posición angular, cambiando la carga hidrodinámica tanto en la hélice como en las compuertas. Se ha demostrado que esto tiene un efecto positivo en la eficiencia, particularmente durante condiciones del mar, clima o corrientes cambiantes.

Para fines de maniobra, la función de las compuertas es cambiar de un dispositivo generador de empuje a un dispositivo de dirección de empuje. También mejora el rendimiento de las maniobras al hacer posible reducir los círculos de giro con velocidades de giro más altas. Usando este sistema se puede generar empuje en ángulos de hasta 80 grados, lo que podría eliminar la necesidad de usar propulsores de túnel en casos específicos. [43]

La reducción resultante en el consumo de combustible depende del tipo de embarcación, su perfil operativo y la hélice y el timón de referencia. Los buques con sistemas de hélices altamente cargados, como los portacontenedores o los buques multipropósito, pueden lograr los mayores ahorros de energía. Se pueden estimar los ahorros de energía para cualquier embarcación una vez que se conocen los parámetros de entrada, pero generalmente son significativamente superiores al 5%. La principal aplicación de la tecnología de timón de compuerta son los barcos de un solo eje.

### 3. Recuperación de la energía del motor.

#### 3.1 Para el motor de baja velocidad

Los fabricantes de motores de baja velocidad disponen desde hace muchos años de sistemas de recuperación de energía para motores de buques. El primer sistema ofrecido se basaba normalmente en una turbina de escape suplementaria que se alimentaba desde el receptor de escape con una fracción del caudal de escape del motor, del orden del 10%. La turbina de escape podría conectarse al cigüeñal del motor o, alternativamente, a un generador eléctrico. Dado que los precios del combustible han sido demasiado bajos para que estos sistemas sean rentables, el número de sistemas instalados es relativamente pequeño.

Desde hace algunos años se han desarrollado sistemas más avanzados que hoy son comerciales, al menos para los motores de baja velocidad. Ejemplo de ello es el sistema TES (Sistema de Eficiencia Térmica) de B&W, que combina una turbina en los gases de escape con un ciclo de vapor impulsado por el calor de escape y que funciona con una turbina de vapor. Las dos turbinas están acopladas a un generador para la producción de energía eléctrica. La energía se puede utilizar para accionar un generador/motor de eje para ayudar al motor principal, o consumir en otro lugar del buque.

Se estima que el aumento correspondiente de la potencia del motor se sitúa entre el 9% y el 11%, lo que, en términos de eficiencia del eje, aumenta del 49,5% hasta un 55% aproximadamente. Las aportaciones de los dos sistemas son, respectivamente, del 5% y el 6%, de la turbina de escape y de la turbina de vapor. La eficiencia del ciclo de vapor se ve limitada en cierta medida por la temperatura mínima recomendada de la chimenea de escape, que debe ser superior a 180°C para controlar la formación de depósitos y la corrosión por el óxido de azufre relacionados con el uso de fuel oil.



### 3.2 Para los motores de velocidad media.

Los ciclos de vapor, como medio de recuperación de energía, tienen algunas propiedades que son bastante desafiantes a bordo de un buque. El nivel de temperatura relativamente bajo hace que los sistemas sean relativamente voluminosos. En particular, el condensador funciona a la baja densidad de vapor existente a la temperatura de condensación real.

Los sistemas de ciclo Rankine con fluido orgánico (ORC<sup>13</sup>) que han sido diseñados y ya son comerciales, muestran algunas propiedades favorables, en particular unas necesidades de espacio mucho menores en comparación con un sistema de vapor. El fluido de trabajo es actualmente alcanos o líquidos de refrigeración. Debido a las propiedades de los fluidos de trabajo (peligro de incendio, propiedades de agotamiento de la capa de ozono), el CO<sub>2</sub> de alta presión se considera un fluido de trabajo más deseable.

Los motores Diesel de media velocidad tienen una menor eficiencia del combustible en comparación con los de baja velocidad, generalmente en el rango del 42% al 44,5%. Estos motores normalmente tienen una temperatura de los gases de escape en el rango de 300°C a 360°C. Mientras que la temperatura mínima de la chimenea de escape es de 180°C o superior, lo que limita la recuperación térmica, la utilización de energía se calcula en el rango de aproximadamente el 3,5% de la potencia del eje.

### 3.3 Para motores de gas.

Debido al aumento de los precios del fuel oil y a las regulaciones para controlar las emisiones de escape (restricción de las operaciones o impuestos), existe un interés creciente en utilizar motores de gas, que utilizan gas natural, en aplicaciones marinas. Los motores de gas actualmente disponibles para la propulsión de buques, con agujeros de émbolo en el rango de 25 cm a 50 cm, tienen una eficiencia del eje ligeramente superior (en el MCR<sup>14</sup>) que sus homólogos diésel, normalmente en el rango de 44,5% a 47%, dependiendo del tamaño del motor y del concepto del motor (encendido por chispa y combustible dual).

Los motores de gas ofrecen un mayor potencial de recuperación de energía. Esto se debe a las temperaturas de escape más elevadas (normalmente en el rango de 400°C a 430°C) y a la posibilidad

---

<sup>13</sup> La tecnología ORC, ciclo Rankine con fluido orgánico (Organic Rankine Cycle) utiliza un fluido de trabajo orgánico en lugar de agua, para aprovechar fuentes de calor de baja temperatura. Las aplicaciones más populares incluyen la cogeneración a partir de biomasa y la generación de electricidad a partir de depósitos geotérmicos e instalaciones de energía solar de concentración, así como la recuperación de calor residual de turbinas de gas, motores de combustión interna y procesos industriales de media y baja temperatura. Disponible en: <[https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclos\\_Rankine\\_con\\_fluido\\_org%C3%A1nico](https://es.wikipedia.org/wiki/Ciclos_Rankine_con_fluido_org%C3%A1nico)>

<sup>14</sup> MCR: se refiere a Maximun Continuous Rating, o Potencia Máxima Continua, siendo la potencia máxima que puede desarrollar un motor, en funcionamiento ininterrumpido.

de funcionar con una temperatura en los tubos de gases de escape inferior a 100°C. Esto se puede hacer, mientras el combustible no contenga azufre y la combustión produzca cantidades muy pequeñas de partículas. Por lo tanto, es probable que el sistema de escape se vea poco afectado por la baja temperatura del tubo de escape.

Un cálculo simplificado, basado en una temperatura del gas de escape de 430°C y una temperatura en los tubos de escape de 50°C, da una eficiencia teórica (Carnot) de aproximadamente el 32,5%. Teniendo en cuenta una eficiencia de la turbina del 80% y algunas pérdidas adicionales relacionadas con el bombeo y los intercambiadores de calor, la eficiencia total de recuperación podría situarse en el nivel del 22%. Utilizando cifras reales del caudal térmico de escape y de la potencia del eje del motor, la cifra de recuperación de energía es del 13% de la potencia del eje. Esto significa que la eficiencia real del eje aumenta del 45% al 50,9%.

Una de las tecnologías desarrolladas por la empresa conjunta BeH<sub>2</sub>ydro<sup>15</sup>, es un motor dual fuel que funciona con un 75% de hidrógeno y un 25% de diésel [27]. Se basa en el motor DZC inicial de ABC, y sólo se necesita diésel para la inyección inicial de combustible. Sin embargo, cuando no se dispone de hidrógeno, el motor es capaz de cambiar inmediatamente a un funcionamiento diésel mono-combustible. La figura 25 ilustra cómo funciona la combustión.

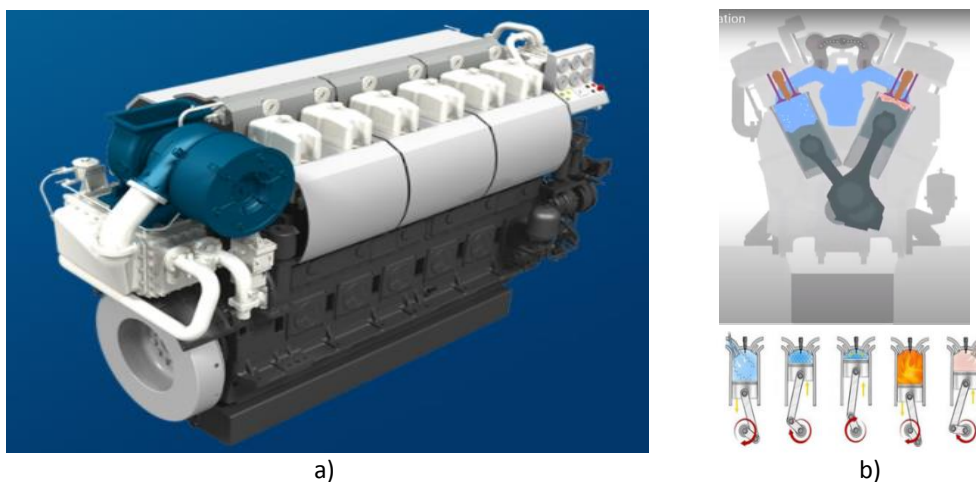


Figura 25: a) Motor dual fuel 6DZD/Spark Ignited (75 % H<sub>2</sub> y 25 % diésel) y b) el proceso de combustión del hidrógeno. Fuente: [44]

<sup>15</sup> BeH<sub>2</sub>ydro es la empresa conjunta entre dos empresas belgas, a saber, Company Maritim Belge (CMB) y Anglo Belgian Corporation (ABC), que desarrolla motores de hidrógeno y soluciones de almacenamiento para aplicaciones marinas, ferroviarias y de energía. Disponible en: < <https://www.behydro.be/en/home.html> >

El hecho de que se necesite menos gasóleo para hacer funcionar este motor, si se dispone de suficiente hidrógeno, permite reducir eficazmente las emisiones. El motor emite entre un 65% y un 85% menos de CO<sub>2</sub>. Las emisiones de otros contaminantes dependen de la calidad de los sistemas de postratamiento, lo que reduce, entre otras cosas, la cantidad de NOx emitida. Además de este motor dual fuel, también existe un motor de hidrógeno completo disponible, que no emite CO<sub>2</sub>. Los motores de combustión de hidrógeno BeH<sub>2</sub>ydro pueden adaptarse a los sistemas de postratamiento: SCR (reducción catalítica selectiva) y DPF (filtro de partículas diésel) [27].

La mayor ventaja de este sistema es que no se deben hacer inversiones costosas en el equipamiento necesario para la propulsión con pilas de combustible. El motor desarrollado por BeH<sub>2</sub>ydro es una adaptación al motor existente que lo hace financieramente más factible. Además de esta ventaja, la posibilidad de un motor dual fuel permite invertir más gradualmente en infraestructura de hidrógeno. Una desventaja que cabe mencionar es la menor densidad volumétrica de energía del hidrógeno, lo que repercute en la autonomía de los buques equipados con este motor [27]. Cuanto más hidrógeno utilice el motor, menos autonomía tendrá la nave. Por lo tanto, la tecnología sólo es aplicable en buques con un recorrido corto.

#### 3.4 Disposición de la maquinaria y propulsión híbrida.

En la actualidad, los buques cisterna, graneleros, portacontenedores y buques de carga general tienen un gran motor de propulsión de baja velocidad conectado directamente a la hélice. Este sistema ha demostrado ser muy eficaz y, dado que los buques funcionan principalmente con una elevada carga de motor, poco se puede ganar con sistemas complejos de maquinaria multi-motor o con sistemas híbridos de propulsión. Para el segmento Ro-Pax/Cruise, actualmente es común utilizar múltiples motores y dos o más hélices. Una de las principales razones de ello son las restricciones impuestas a las corrientes de aire y la elevada demanda. Otra razón es la limitación de espacio y la utilización de motores de velocidad media, por lo que ya se necesita (y se pierde la transmisión) una caja de cambios. Esta situación multi-motor abre algunas posibilidades para el diseño de sistemas capaces de manejar cargas variables.

Existen algunas tecnologías aplicadas a determinados tipos de buques, como se describe a continuación.

Hoy en día la mayoría de los superyates tienen motor diesel de doble propulsión, con líneas de eje abierto y dos timones de pala. Sin embargo, la diversidad del perfil operativo de los superyates y sus consecuencias en la eficiencia de la propulsión, ha generado una tendencia hacia la propulsión híbrida. Los sistemas de propulsión híbridos permiten mayores eficiencias de propulsión con todas las cargas del motor.

Un estudio reciente con una muestra de 27 yates, ha demostrado que más del 50% del tiempo de funcionamiento estuvo a menos del 20% de la carga del motor. Menos del 5% del tiempo de funcionamiento estuvo sobre el 80% de carga del motor. El promedio anual de horas de funcionamiento fue tan bajo como 277 por yate [45]. Estos perfiles de explotación difieren considerablemente de los de la mayoría de los buques mercantes.

Uno de los miembros del SYBA <sup>16</sup> elaboró un concepto híbrido, mostrado en la figura 26 que comprende:

- Forma del casco optimizada para el sistema de propulsión alternativo.
- Una hélice impulsada por un motor diésel mediano (en lugar de dos motores de revoluciones superiores).
- Contra accionado eléctrico giratorio azimutal en la popa detrás de la hélice impulsada por Diesel.



**Figura 26: Instalación de hélice principal única en la línea central y un propulsor azimutal en línea, del super yate híbrido Savannah. [46]**

El buque CRP-Pod podría mejorar el rendimiento de la propulsión en un 13% en comparación con el sistema convencional de doble eje y hélices. Un sistema de propulsión similar ya está en funcionamiento en grandes transbordadores japoneses. Las extensas pruebas de modelos de buque han demostrado un ahorro considerable de combustible a todas las velocidades de funcionamiento.

3.5 La propulsión híbrida diésel-eléctrica combinada con el uso de baterías para el almacenamiento de energía.

La mayoría de los motores diésel tienen su rendimiento óptimo (SFOC) entre el 70% y el 80% de MCR (a menos que estén especialmente ajustados para un funcionamiento de baja carga donde el SFOC más bajo se produce con un porcentaje de MCR más bajo) [30]. Algunos sistemas de propulsión diésel-eléctrico funcionan en una situación de carga variable, lo que significa que en ocasiones múltiples conjuntos de generadores (o grupo electrógeno) funcionan a muy baja carga,

---

<sup>16</sup> SYBAss : Superyachts Builders Association.

es decir, lejos del punto óptimo, lo que da lugar a un SFOC elevado y a veces, a una carga muy elevada cercana al 100% del MCR. Para estos sistemas es beneficioso cambiar el perfil de funcionamiento de forma tal que todos los grupos electrógenos funcionen en el punto óptimo, de manera que el excedente de energía eléctrica se acumule en baterías para su uso en los períodos en los que se necesita una elevada potencia de propulsión. Con un sistema así llamado híbrido a menudo se pueden omitir uno o dos grupos electrógenos, ya que la electricidad adicional se toma directamente del paquete de la batería.

Los sistemas híbridos son cómodos en los transbordadores diésel-eléctricos en rutas cortas, donde hay una demanda de potencia muy elevada durante la fase de aceleración, mientras que la demanda de potencia es limitada cuando se ha alcanzado la velocidad de servicio [30].

### 3.6 Propulsión de pilas de combustible.

Las pilas de combustible tienen un alto potencial de eficiencia térmica y bajas emisiones. Por esta razón, la tecnología de las pilas de combustible constituye también, en principio, una alternativa interesante a la utilización de motores de combustión tradicionales para la navegación mercante. Las pilas de combustible se pueden utilizar independientemente en un ciclo combinado, donde se recupera el calor de los gases de escape para generar más energía. Se ha determinado que los sistemas de pila de combustible son generadores de energía especialmente prometedores tanto para la potencia hotelera como para los sistemas híbridos de propulsión, en los que funcionan en combinación con un motor diésel [30].

Hay muchas cuestiones relacionadas con el uso de pilas de combustible a bordo de los buques. Las pilas de combustible utilizan combustibles no convencionales, como el hidrógeno o el metanol, y/o requieren un tratamiento importante del combustible. Además, existen consideraciones de precio y fiabilidad, lo que hacen que resulten menos interesantes en la actualidad respecto a otras opciones de eficiencia/reducción. Los principales obstáculos tecnológicos para el funcionamiento de las pilas de combustible a bordo de buques medianos y grandes son su peso y volumen excesivos, así como la seguridad del almacenamiento y la manipulación a bordo del combustible (hidrógeno). Por consiguiente, las prioridades adicionales en materia de *I+D* incluyen [30]:

- Desarrollo de sistemas de tratamiento de combustible para unidades de pila de combustible capaces de funcionar con combustibles líquidos;
- Sistemas de recuperación de energía (por ejemplo, calderas, turbinas) para su utilización en combinación o integración con sistemas de pilas de combustible de alta temperatura;
- Normalización de los sistemas de pilas de combustible (incluidos los sistemas auxiliares) en módulos de 0,5 MW a 1,0 MW;
- Sistemas intrínsecamente seguros para el almacenamiento a bordo del combustible y su manipulación;

- Desarrollo y validación a gran escala de sistemas con respecto a su utilización en el medio marino: fiabilidad, disponibilidad, vibración, aceleraciones, salinidad, humedad y capacidad de respuesta a las demandas de energía transitorias.
- Disminución de los costos.

### 3.7 Eficiencia de la caldera con recuperación de calor residual (economizador).

En las aplicaciones de cogeneración (Combined Heat and Power, CHP) [30], una planta de energía convencional que produce electricidad se mejora con un sistema de recuperación de calor para utilizar la energía que de otro modo se desperdiciaría en los gases de escape. Dado que el calor residual de los gases de escape es una fuente de energía gratuita; cuanto más se recupera, más se ahorra.

Un sistema de recuperación de energía de calor residual instalado en un buque recupera la energía térmica residual del motor principal y la utiliza para generar electricidad con un sobrealimentador híbrido equipado para generar energía y un turbogenerador, que se combina con una turbina de vapor. La electricidad generada no solo satisface las demandas de energía a bordo, sino que también ayuda a la propulsión del barco a través del motor de eje instalado en el cigüeñal del motor principal. Esto reduce el consumo de combustible tanto del generador de energía como del motor principal, lo que también contribuye a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. [47]

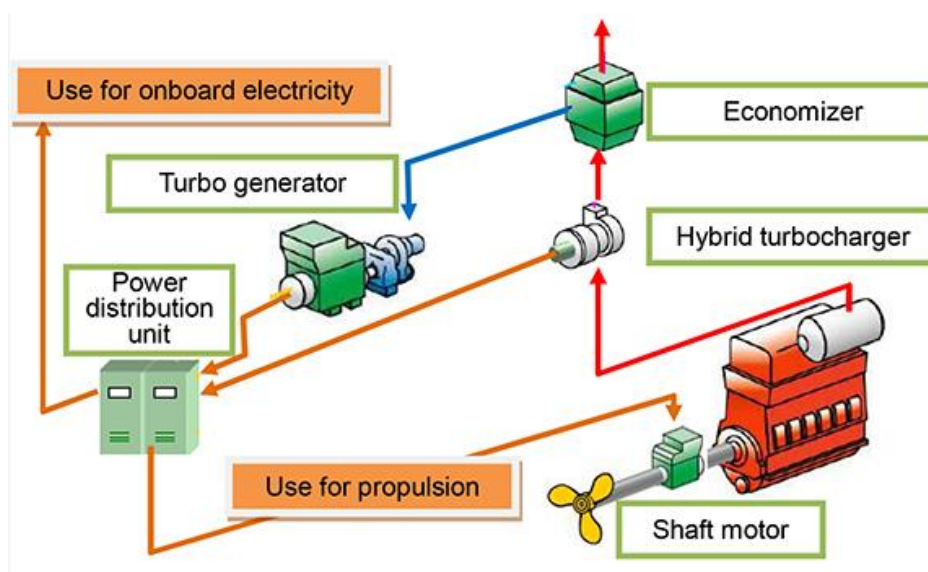


Figura 27: Diagrama de instalación de un sistema de recuperación de energía del calor residual de un buque. Fuente: [47]

El reemplazo del damper de control de aire por un variador de frecuencia (VFD<sup>17</sup>) puede mejorar el consumo de combustible del barco. Con el VFD el ahorro de energía puede variar entre un 5 % y un 30 % dependiendo del índice de encendido de la caldera [48].

### 3.8 Optimización de los gases de escape a través de la recuperación de calor residual (motor principal y auxiliar)

Los sistemas de recuperación de calor residual recuperan la energía térmica de los gases de escape y la convierten en energía eléctrica, mientras que el calor residual se puede utilizar para los servicios del barco (como agua caliente y vapor). El sistema puede consistir en una caldera de gases de escape (o combinada con una caldera de gasóleo), una turbina de potencia y/o una turbina de vapor con alternador. En el rediseño del barco se pueden acomodar eficientemente las calderas para adaptarse mejor a estos sistemas. Ver la figura 28.

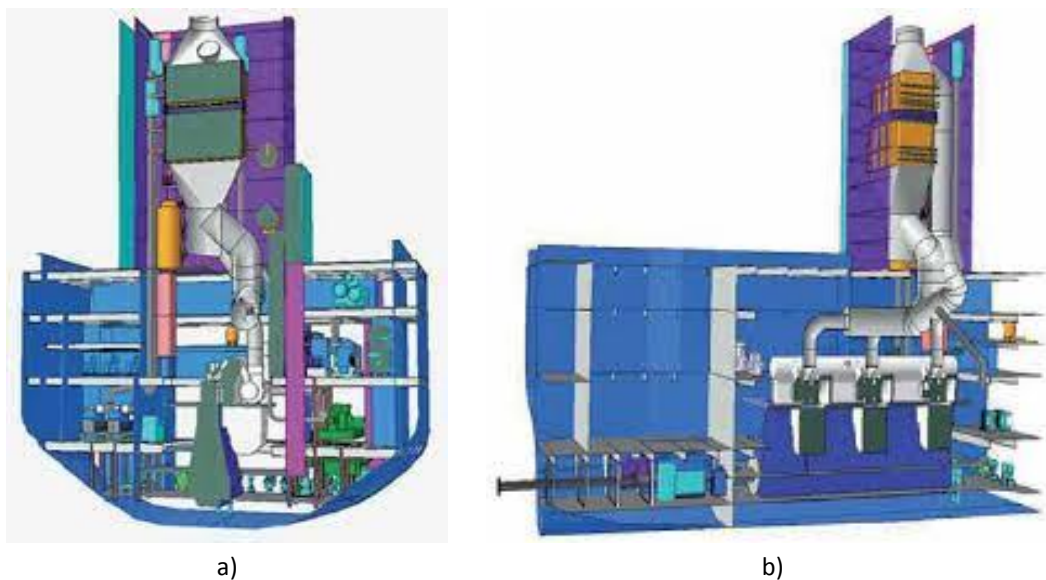


Figura 28: Sala de máquina de un buque portacontenedores con sistema WHR, a) sección transversal, b) sección longitudinal. Fuente: [49]

En los sistemas de motor, el 25% de la energía de combustible del motor se destina al flujo de escape como calor residual. Recuperando esta energía con una caldera o con un WHRS es posible reducir tanto el consumo de combustible como las emisiones. La energía convertida puede utilizarse para la producción de vapor y agua caliente, la producción de electricidad adicional, la calefacción de fuelóleo o el suministro de calefacción y refrigeración.

<sup>17</sup> Variador de frecuencia (Variable Frequency Drive, VFD): es una tecnología de enfriamiento de ahorro de energía muy eficiente. Los variadores permiten regular con precisión la velocidad de los motores eléctricos utilizados en aplicaciones de refrigeración, asegurando que se produzca el flujo necesario en todo momento, lo que se traduce en un ahorro de energía de hasta un 35 %.

Hasta ahora no se ha tenido en cuenta el calor residual de los motores auxiliares, pero contiene una gran cantidad de energía que puede utilizarse para complementar las necesidades de vapor durante las escalas portuarias y, en el caso de algunos buques, también durante la travesía. A diferencia del funcionamiento continuo del motor principal durante los viajes oceánicos, el funcionamiento de los motores auxiliares varía. Para el motor combinado con WHRS la eficiencia total aumentará a alrededor del 55% [49].

La WHRS, ha sido desarrollada como una solución personalizada, centrada en la generación de energía en condiciones de carga variables. La fórmula EEDI de la OMI permite considerar la adición de WHRS en el buque, analizar los efectos EEDI y los ajustes EEDI. Dado que es posible reducir aún más las emisiones de CO<sub>2</sub> mediante la instalación de un sistema de recuperación de calor residual, el EEDI, que es una medida de las emisiones de CO<sub>2</sub>, también se reducirá.

### 3.9 Postratamiento de los gases de escape (SCR)

Los sistemas postratamiento de emisiones se instalan a la salida del motor para eliminar las sustancias contaminantes antes de emitirlos a la atmósfera. El sistema de postratamiento más conocido es el catalizador de gases SCR (Selective Catalytic Reactor), donde se lleva a cabo el proceso de reducción catalítica selectiva. Este proceso de postratamiento de los gases de escape se basa en la reducción de los óxidos de nitrógeno (NOx) con la inyección de amoníaco (NH<sub>3</sub>), en presencia de exceso de oxígeno (O<sub>2</sub>) y un catalizador, todo esto dentro de un rango de temperatura apropiado dan lugar a la transformación de los NOx en sustancias inocuas tales como el nitrógeno (N<sub>2</sub>) y en vapor de agua (H<sub>2</sub>O). [50]

La tecnología SCR puede utilizarse para aplicaciones de NOx de Nivel II y de Nivel III<sup>18</sup>. Especialmente cuando se opera con un requisito de Nivel II, el rendimiento de reducción de NOx de un sistema SCR puede utilizarse de forma que el motor se optimice al máximo consumo de combustible específico posible (SFOC), aceptando emisiones elevadas de NOx del motor, que se reducen al nivel requerido mediante el uso de un sistema SCR [31].

---

<sup>18</sup> Véase Regla 13.3 Relativo al control de emisiones de óxidos de nitrógeno de los motores diésel marinos, del Anexo VI del Convenio Marpol, y Tabla 2 sección 2.2 del presente documento.



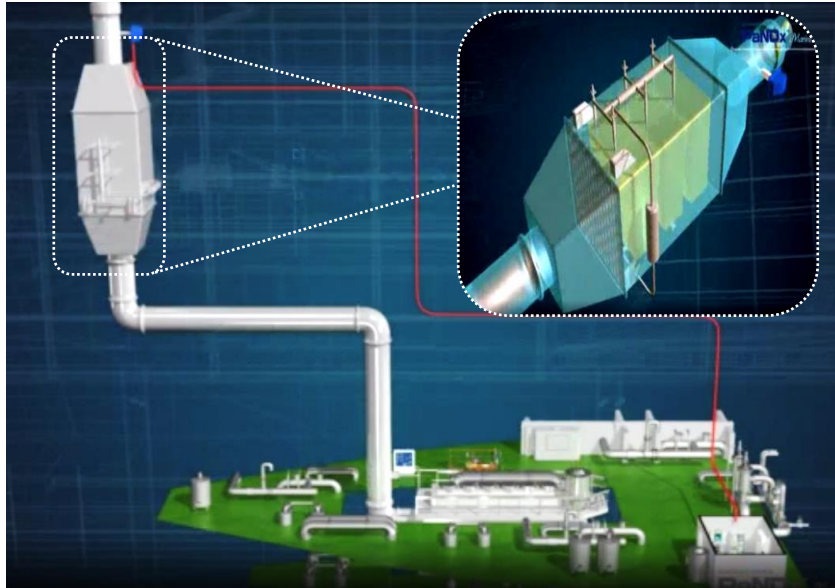


Figura 29: Sistema de reducción catalítica selectiva NOx PaNOx™ para buques. Fuente: Panasia Co. Ltd [50]

Otro sistema para eliminar los residuos de las emisiones es aplicable a algunos barcos de baja y media velocidad. Los buques que sólo pueden utilizar combustibles con bajo contenido en azufre, cambiar a gas natural o, alternativamente, deben estar equipados con depuradores de tratamiento de gases de escape, lo que representa una solución tecnológica mucho más económica en muchos casos. Un sistema de limpieza de gases de escape (EGCS) o depurador es un equipo para purificar los gases de escape en un buque marino con combustible diesel. Elimina el gas tóxico SOx y las partículas sólidas de los gases de escape antes de expulsarlos a la atmósfera.

En algunos casos la combinación eficiente con EGCS podría tenerse en cuenta como reducción de  $P_{AE}$  (véase ecuación 1 sección 3.11). El efecto máximo sería de alrededor del 5%. El efecto de esta tecnología sería menor si la temperatura de los gases de escape es relativamente baja.

#### 4. Revestimientos de casco

##### 4.1 Selección de revestimientos.

En un proyecto de investigación gestionado por MARINTEK<sup>19</sup> [30], se han ensayado en 16 buques noruegos, durante un período de siete años, una serie de revestimientos anti-incrustantes, tanto *anti-fouling* como *foul-release* (para disminuir la adherencia entre los organismos marinos y el sustrato), procedentes de cinco grandes fábricas. Los resultados muestran que estos nuevos recubrimientos son tan eficaces como los sistemas basados en TBT. (Las pinturas que contienen TBT están prohibidas en virtud del Convenio Internacional sobre el Control de sustancias antiincrustantes perjudiciales en los buques, del 2001, establecido por la OMI).

<sup>19</sup> MARINTEK: Instituto Noruego de Investigaciones sobre Tecnologías Marinas.

#### 4.2 Polímeros y lubricación de aire.

La resistencia a la fricción puede reducirse mediante la modificación de la superficie mojada del casco, por ejemplo, introduciendo ranuras que imitan las escamas de los tiburones o aplicando un realce artificial (por ejemplo, utilizando burbujas de aire y/o cavidades de aire y polímeros). Todavía se está investigando la lubricación de aire en los cascos de los buques convencionales, pero hasta ahora no se han conseguido mejoras significativas. Se alega que la tecnología de lubricación por aire proporciona reducciones de resistencia superiores al 5%, lo que resulta significativo en este contexto [30]

La tecnología de lubricación por aire reduce la resistencia a la fricción de la embarcación mediante la creación de una alfombra de microburbujas que recubre la mayor parte del fondo plano del casco de la embarcación [51]. Las microburbujas, miden entre 1 y 3 mm de diámetro, son generadas por unidades de liberación de aire en la parte inferior del casco. Ver la figura 30. El sistema funciona en todas las condiciones del mar, no depende del clima y no restringe ni afecta negativamente el perfil operativo normal de la embarcación.



**Figura 30: Tecnología de lubricación por aire, sistema Silverstream®. Fuente: Wartsila [51]**

La adición de una pequeña cantidad de polímero a un flujo turbulento de fluido newtoniano puede dar lugar a una reducción de la resistencia viscosa a la fricción. Durante las últimas tres décadas, numerosas actividades de investigación se han dedicado a la reducción de la resistencia a la fricción mediante la aplicación de polímeros. Como resultado, se han desarrollado aproximadamente tres métodos principales de reducción de la fricción mediante polímeros [30].

El primer método se basa en una escala molecular, ya que se ha estudiado el comportamiento de las moléculas de polímeros en diversos flujos de modelos. El segundo tipo de método se basa en la investigación de los efectos de los polímeros en las estadísticas de turbulencia promediada en el tiempo, mientras que el tercer tipo de método examina los cambios en la estructura turbulenta coherente debido a la presencia de polímeros. Como en el caso anterior de la tecnología de

lubricación por aire, los tres métodos de utilización de polímeros para reducir la resistencia a la fricción aún no están maduros, por lo que todavía se está investigando en este sentido. Además, el concepto de inyección continua de polímeros en el agua puede no ser adecuado para un funcionamiento sostenible. Por lo tanto, el concepto de inyección de polímeros aún no se considera muy importante para reducir la resistencia del buque.

Sin embargo, cabe señalar que cualquier mejora de las superficies mojadas del casco que se consiga con estos medios también puede inhibir el crecimiento orgánico. Ninguna de las tecnologías mencionadas está probada en servicio. Además, un sistema de burbujas de aire requeriría energía adicional para producir las burbujas.

Los recubrimientos de casco basados en la nanotecnología han sido anunciados por diferentes empresas desde hace algún tiempo, y también se han mencionado recientemente en los medios de comunicación. Se afirma que estos recubrimientos tienen el potencial de reducir en gran medida la resistencia viscosa básica a la fricción del casco submarino y retrasar el inicio del crecimiento marino durante un período prolongado.

En la actualidad, las afirmaciones no están fundamentadas en gran medida pero, si en el futuro se pueden realizar parcialmente, cabría esperar reducciones de energía de tal vez un 15% [30]. Por lo tanto, este tipo de recubrimiento del casco submarino será una de las contribuciones más importantes para reducir el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub> de los buques convencionales bien diseñados. Será especialmente favorable que tales revestimientos puedan aplicarse tanto a los buques nuevos como a los existentes.

## 5. Energías alternativas.

### 5.1 Energía eólica

La energía eólica se puede utilizar de varias empleando en los buques varias tecnologías [30]. Entre ellas cabe mencionar:

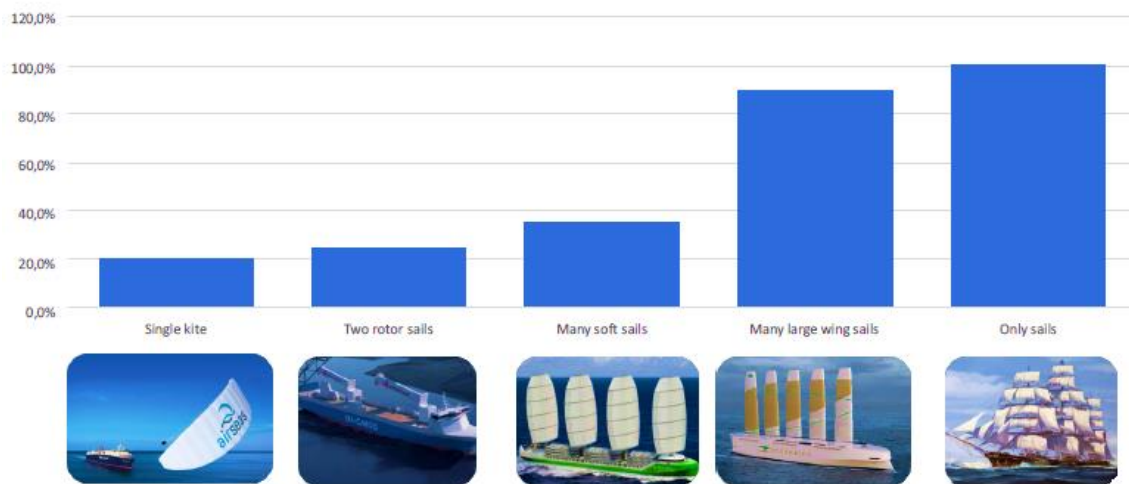
- Velas tradicionales;
- Velas de ala sólida;
- Cometas;
- Rotores de tipo Flettner.

Aunque las velas eran en el pasado la única fuente de propulsión, en la actualidad se consideran interesantes para proporcionar una potencia suplementaria adicional como sugieren, por ejemplo, estudios recientes. El uso de velas tradicionales impondrá momentos de flexión al casco, provocando que los barcos aparezcan en la lista. Los problemas de resistencia podrían hacer necesario que los mástiles bajaran hasta la quilla, y la presencia del mástil y del aparejo podría tener un impacto significativo en la manipulación de la carga.

Las cometas se diferencian de otros conceptos de energía eólica por tener una pequeña huella durante la instalación y por lo tanto ser bastante factible de retro-adaptar. Las desventajas con los sistemas de cometa incluyen los complejos sistemas de lanzamiento, recuperación y control que se

necesitan. Además, la durabilidad de los materiales ligeros que se necesitan para las velas de cometa es un reto. Las velas de alas son estructuras sólidas que se asemejan a las alas de los aviones, que proporcionan más empuje con menos resistencia que las velas convencionales.

Los rotores de tipo Flettner generan empuje a partir de un objeto giratorio en el viento, aprovechando el llamado efecto Magnus<sup>20</sup>. Estos sistemas tienen características diferentes en cuanto a cómo el empuje generado se relaciona con otros parámetros, como el ángulo del viento, la fuerza del viento, la estabilidad del viento y la velocidad del buque. En la siguiente figura (31) se muestran ejemplos de declaraciones de ahorro de combustible empleando tecnología de propulsión eólica.



**Figura 31: Ahorro de combustible (%) empleando propulsión eólica. Fuente: Jarle Kramer (NTNU), Smart Maritime Webinar: Wind-assisted propulsion.**

La energía del viento varía según la región y el área. Algunos estudios realizados con diferentes tipos de vela, en dos tipos de buques y en tres rutas diferentes, han indicado que el potencial de energía de las velas es mayor en el Atlántico Norte y el Pacífico Norte que en el Pacífico Sur; el ahorro de combustible es mayor a velocidades más bajas debido a la baja demanda total de potencia de propulsión [52]. En términos porcentuales, el ahorro se sitúa normalmente en torno al 5% a 15 nudos, aumentando hasta aproximadamente el 20 % a 10 nudos.

En la actualidad se dispone de una experiencia limitada a escala real con veleros comerciales modernos que permiten validar estas tecnologías, también es difícil evaluar la viabilidad práctica

<sup>20</sup> El efecto Magnus explica que, si por frotamiento alteramos la velocidad en dos caras de una superficie expuesta al viento, se produce un empuje en el lado en el que el viento se mueve más rápido. Exactamente lo mismo que consiguen las velas trabajando en perfil alar.

del tamaño y el número de velas modeladas. Por lo tanto, las cifras anteriores deben considerarse indicativas. Sin embargo, la potencia asistida a vela parece ser una oportunidad interesante para ahorrar combustible a medio y largo plazo.

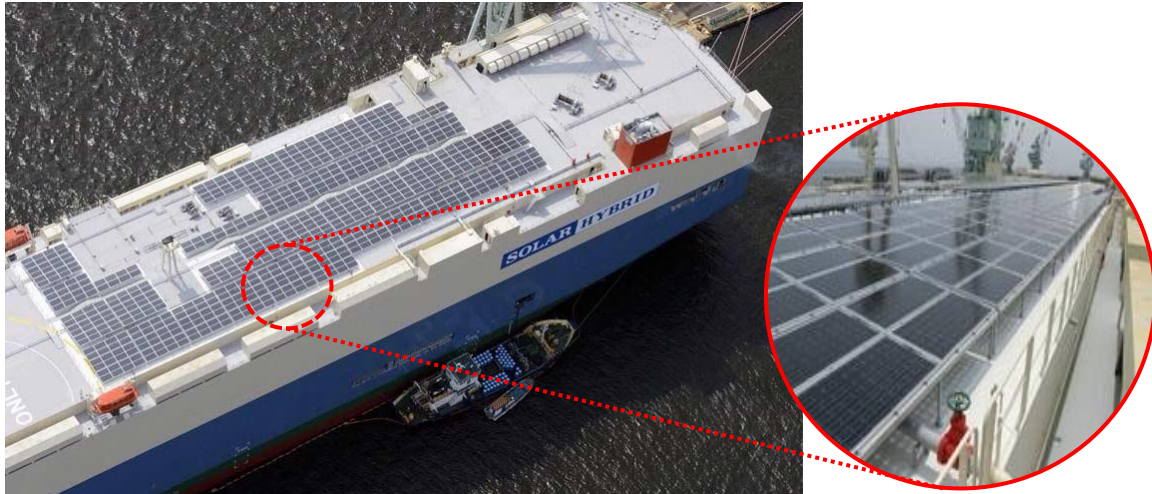
## 5.2 Energía solar.

Al evaluar el potencial de la energía solar para su aplicación en los buques, es interesante considerar el potencial de energía disponible. La irradiación solar media de la Tierra en la superficie es de aproximadamente  $342 \text{ W/m}^2$  [30] En promedio, el 30% de esta radiación se reflejará de vuelta al espacio. Las nubes son el principal contribuyente a la reflexión. La irradiación solar variará con la latitud, la estación, las condiciones meteorológicas y la hora del día. La cantidad de esta energía que una célula fotovoltaica será capaz de captar depende de la eficiencia de la célula y de la posición de la célula en relación con el haz solar. Las células solares actuales tienen una eficiencia de alrededor del 13%. En la actualidad, la mejor tecnología, que se utiliza en los laboratorios y en las naves espaciales, tiene una eficiencia de aproximadamente el 30%. Se prevé que las eficiencias alcancen el 45%-60% cuando se desarrollen y maduren células fotovoltaicas de tercera generación. Para hacerse una idea de la potencia que puede obtenerse de las células fotovoltaicas de un buque, se ha hecho el siguiente cálculo para un buque cisterna de 270 m de eslora y 50 m de manga. Un buque cisterna de este tamaño está equipado con un motor de aproximadamente 18.000 kW, y la potencia auxiliar sería de alrededor de 1.000 kW. En la Tabla 8 se muestra la producción de energía mediante células fotovoltaicas, suponiendo que la cubierta del buque esté completamente cubierta por células solares.

	Actual	Mejores actuales	Futuro
Eficiencia energética aproximada (%)	13	30	60
Potencia nominal (kW)	609	1 406	2 811
Potencia ajustada por reflexión (kW)	426	984	1 968

**Tabla 8 Producción de energía mediante células fotovoltaicas. Fuente: [30]**

Así pues, la tecnología actual de las células solares sólo bastaría, por término medio, para cubrir una fracción de la potencia auxiliar, incluso si toda la superficie de cubierta estuviera cubierta por células fotovoltaicas. Por lo tanto, puede concluirse que, debido a la limitada capacidad de las células solares con respecto a la superficie que cubren, todavía no parecen ser una fuente de suministro energético muy eficiente [30][31]. Aunque en determinados momentos y en determinadas zonas, la radiación solar será superior a la media y podría satisfacerse la demanda de energía auxiliar. Además, si se utilizaran células solares de tipo nave espacial de alta eficiencia (presumiblemente costosas), se podría satisfacer, en promedio, la demanda actual de energía.



**Figura 32: Car Carrier Emerald Ace, híbrido con 780 paneles solares instalados en la cubierta. Fuente: Mitsui O.S.K.Lines.**

Además, dado que no siempre se dispone de energía solar (por ejemplo, de noche), se necesitaría energía de reserva; incluso si se dispone de energía, por término medio, durante el día, ello no contribuiría a reducir la demanda de energía auxiliar durante la noche, a menos que se disponga de un sistema de almacenamiento de energía a bordo.

Cabe mencionar como ejemplo el proyecto de estudio Aquarius Eco Ship, iniciado por Eco Marine Power Co. Ltd en mayo de 2011 [53]. El Aquarius Eco Ship es un diseño de concepto de transporte marítimo ecológico y un proyecto de estudio integral en curso centrado en optimizar el diseño de buques de alta mar, como graneleros, petroleros, buques Ro-Ro y cruceros, para aprovechar la energía del viento y del sol, además de incorporar otras tecnologías de reducción de emisiones y eficiencia energética y futuros sistemas de propulsión, incluidas las pilas de combustible de hidrógeno. Este sistema innovador y patentado de ahorro de combustible y reducción de emisiones, incorpora una variedad de elementos que incluyen paneles solares de grado marino, módulos de almacenamiento de energía, sistemas de control por computadora y un avanzado diseño de vela rígida.

## 6. Otras Tecnologías.

### 6.1 Optimización de las dimensiones principales.

Cambiar la restricción del puerto, canal, etc. puede traer la mejora del rendimiento de la propulsión modificando las dimensiones principales. ej. la expansión del canal de Panamá.

### 6.2 Reducción del peso ligero.

Aumentar el peso muerto mediante la reducción del peso ligero, manteniendo el mismo desplazamiento.

### 6.3 Estabilizadores para Superyates.

Hoy en día la mayoría de los superyates están provistos de estabilizadores de velocidad cero para su uso en el ancla. Estos estabilizadores no suelen ser retráctiles, lo que da lugar a una mayor resistencia del apéndice y a fenómenos adversos de cavitación a velocidades superiores. Por lo tanto, un número creciente de yates está dotado de giros-estabilizadores a bordo que pueden funcionar a cualquier velocidad. Sin embargo, la reducción de la resistencia se compensa parcialmente con el mayor desplazamiento resultante del mayor peso de los giros-estabilizadores.

### 6.4 Casco Vane

El casco Vane se ha aplicado en una serie de superyates [30][31]. El casco Vane es un dispositivo de ahorro de combustible en forma de lámina fija, situado debajo de la popa de un buque. Utiliza la ola de popa para proporcionar empuje hacia adelante, lo que reduce la resistencia e incluso amortigua el cabeceo, balanceo y cabeceo de las olas. Influye en el patrón de onda de popa y crea una elevación hidrodinámica, que está parcialmente orientada hacia delante. Esto da lugar a una reducción de la resistencia del buque. Ver la figura 33.

Según la forma del casco de la embarcación y la velocidad de operación, se puede reducir el consumo de combustible entre un 5 % y un 25 %. El casco también se ha aplicado a los buques de suministro. La aplicación para muchos otros buques mercantes ha demostrado ser eficaz sobre la base de amplios análisis.



**Figura 33: Casco Vane, con ala subacuática diseñada a medida que se acopla al espejo de popa de su embarcación. Fuente: [54]**

### 6.5 Otras aplicaciones de ahorro de energía en superyates.

Otras aplicaciones para los superyates pueden ser [30][31]:

- Tecnologías de iluminación de ahorro de energía como los LED.
- Utilizar el calor residual del motor cuando sea posible para elementos como catalizadores DPF.

- Selecciones de motores y orientación a los operadores sobre los rangos de velocidad para minimizar el BSFC. Estos se verifican en las pruebas de mar ejecutando recorridos de distancia medidos mientras se registra el combustible real consumido.
- Selección y diseño de equipos submarinos para minimizar la resistencia, incluidos equipos de estabilización, dispositivos de protección catódica, formas de puntales de hélice y diseños de alineación y hélice.
- Pruebas de tanques y trabajos de CFD para maximizar la eficiencia de los buques
- Colocación de apéndices como arcos bulbosos para ahorro de combustible
- Amplias estrategias de estimación de peso y reducción de peso para aumentar la eficiencia de los buques (incluida la aplicación de materiales estructurales compuestos y de aluminio y materiales interiores ligeros).
- Optimización de las estrategias de administración de energía para garantizar que los generadores estén produciendo energía con la máxima eficiencia.
- Instalación de equipos Diesel Eléctricos a la altura de los perfiles operativos.

Algunas de las tecnologías anteriores también son aplicables a otros tipos de buques, por ejemplo, a los buques de pasaje.

## **4.5.5. Sistemas de propulsión eléctrica.**

A continuación se analizan dos sistemas de propulsión eléctrica. Uno se centra en las implicaciones de los sistemas de energía híbridos, ya mencionados anteriormente dentro de las tecnologías de propulsión híbrida-diesel. La segunda profundizará en la opción de utilizar un sistema de propulsión totalmente eléctrico [55].

### **1. Análisis de las configuraciones híbridas con propulsión eléctrica.**

Un sistema de propulsión de potencia híbrida utiliza una combinación de dos fuentes de energía para proporcionar energía a la hélice: un motor diesel convencional combinado con un motor eléctrico de batería.

En este contexto, híbrido significa añadir capacidad de batería eléctrica a la configuración de potencia convencional, facilitando una producción de energía más adaptada a la demanda en los distintos modos de funcionamiento. Las baterías tienen las siguientes ventajas:

- Pueden compensar las fluctuaciones de carga, permitiendo que el motor o motores de combustión funcionen a una carga más constante y optimizada.
- Se evita el funcionamiento de motores de combustión a cargas muy bajas y el motor o motores pueden funcionar más a potencia media-alta con menor consumo específico de combustible y menores emisiones.



- Las baterías se activan instantáneamente y pueden proporcionar cualquier pico de potencia exigido por el Sistema de Posicionamiento Dinámico (SDP<sup>21</sup>).
- Permiten que el buque aborte su operación DP de forma segura suponiendo que todos los motores deben detenerse y no empezar de nuevo. Por estas razones, la instalación de baterías puede permitir reducir el número de motores de combustión principales actualmente instalados, es decir, de cuatro o tres a tres o dos.

La siguiente figura 34, ofrece una visión general de los diferentes sistemas de propulsión. El primer sistema mostrado (Estándar Setup) es sólo una configuración estándar que existen para la propulsión híbrida con una configuración donde sólo se utilizan motores de combustible fósil.

En la segunda opción (Adding Batteries) los motores eléctricos con batería constituyen una fuente de alimentación adicional a los motores convencionales existentes. La última configuración (Two engines and batteries) es aquella en la que el uso de un motor eléctrico con batería, permite reducir el número de motores convencionales.

Además de las ventajas operativas, también están las ventajas climáticas. Dado que la OMI y la Unión Europea se centran cada vez más en la sostenibilidad, la investigación sobre esta tecnología de propulsión híbrida para reducir las emisiones de carbono se ha ido ampliando. Los beneficios de descarbonización son sencillos durante las emisiones *tank-to-wake*. Debido a que durante esta fase ningún proceso de combustión tiene lugar, las emisiones de carbono equivalen a cero. sistemas de energía eléctrica se utilizará para alimentar las operaciones auxiliares portuarias como, por ejemplo, las operaciones de grúas, e incluso para los enchufes de los frigoríficos. El potencial de reducción obtenido mediante el uso de sistemas híbridos de energía de esta manera será de alrededor del 5%. Lindstad et al., Kim et al.<sup>22</sup> reportan otras cifras para un estudio específico de contenedores. Según sus estimaciones, el potencial de reducción oscila entre el 9% y el 21% para los buques portacontenedores híbridos batería/generador.

---

<sup>21</sup> SDP: Es un sistema capaz de, automáticamente, controlar la posición y proa de un determinado buque o plataforma mediante el empuje de sus equipos propulsores y acción de su sistema de gobierno. Es controlado por medio de un ordenador, que automáticamente mantiene la posición y rumbo mediante el uso de los sistemas propios de propulsión del barco. Disponible en: José Luis Solares Carral, Posicionamiento Dinámico. Univ. Cantabria 2014

<sup>22</sup> Lindstad, E. and Bø, T.I., 2018. Potential power setups, fuels and hull designs capable of satisfying future EEDI requirements. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 63, pp.276-290.

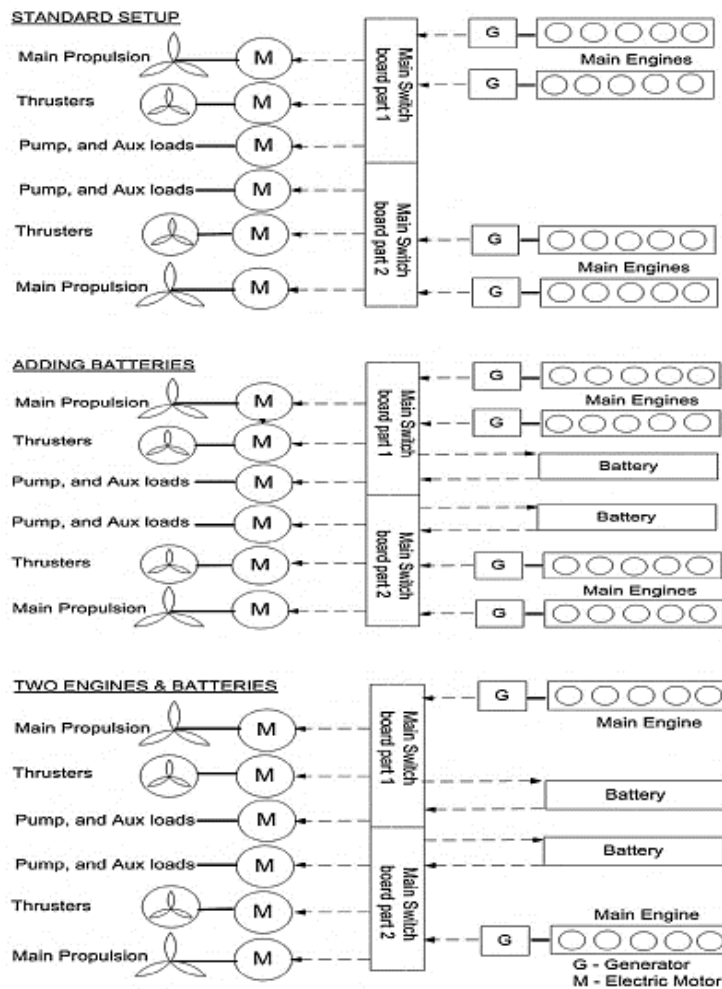


Figura 34: Instalaciones alternativas de potencia y propulsión para buques. Fuente: Lindstad et al., 2017 [55]

Las dragas utilizan sistemas de propulsión híbridos para equilibrar grandes fluctuaciones en la potencia de salida y para reemplazar el motor auxiliar en partes de la operación. El potencial de reducción se sitúa en torno al 10%. En el transporte marítimo por estuario<sup>23</sup>, esta tecnología se utiliza parcialmente para propulsar los buques, es posible, por ejemplo, tener una combinación de GNL y baterías o diesel y baterías. Como estiman Lebkowski et al,<sup>24</sup> [55], el potencial de reducción de los buques de transporte marítimo híbrido en estuario se sitúa entre el 9% y el 30%.

<sup>23</sup> Estuario: desembocadura del río en el mar.

<sup>24</sup> Lebkowski, A., 2018. Reduction of Fuel Consumption and Pollution Emissions in Inland Water Transport by Application of Hybrid Powertrain. Energies, 11(8), p.1981.

Para las embarcaciones de recreo, el potencial de reducción depende en gran medida del tipo de embarcación. En particular, las embarcaciones pequeñas, los yates y las embarcaciones de turismo de nueva construcción podrían beneficiarse de los sistemas híbridos de propulsión eléctrica. El potencial de reducción de estos buques se ajustará al de los demás buques y, por tanto, se situará en torno al 10%. Los veleros podrían utilizar un motor eléctrico para alimentar las operaciones de apoyo en los puertos.

Por último, para los buques pesqueros, la propulsión híbrida contribuye a apoyar y optimizar el funcionamiento de la maquinaria principal, menos propensa a las fluctuaciones de carga. Esto significa que, entre otras cosas, las operaciones de apoyo en los puertos, como el uso de grúas, bombas, cabrestantes y la calefacción y refrigeración intensivas en energía se alimentarían con energía eléctrica. Un estudio de Gabriellii et al. de 2020<sup>25</sup> reporta un posible ahorro de combustible de alrededor del 15%.

Sin embargo, deben mencionarse algunas deficiencias de esta tecnología. Uno de los problemas más graves es la dependencia de baterías con una densidad energética demasiado baja, sobre todo en comparación con los combustibles marítimos convencionales. Esta baja densidad energética tiene implicaciones, las baterías ocupan mucho espacio a bordo del buque y lo más importante es no subestimar su peso. Por lo tanto, este aspecto del lugar y del peso influye también en el funcionamiento del buque y en su capacidad.

Además de las preocupaciones relacionadas con la tecnología de las baterías, el suministro de energía también es un problema. Actualmente el tiempo para cargar las baterías es demasiado largo. Pero lo que es más importante, aunque existen varias iniciativas para proporcionar energía e infraestructura en tierra para cargar las baterías, la infraestructura no está suficientemente desarrollada, lo que dificulta la adopción de la tecnología. Además de estas preocupaciones anteriores, las asociaciones de embarcaciones de recreo (yates, embarcaciones pequeñas, embarcaciones de turismo) indican que la readaptación de la tecnología es muy costosa, por lo que debería utilizarse idealmente en nuevas construcciones.

## **2. Sistema de propulsión totalmente eléctrico.**

La propulsión totalmente eléctrica es la extensión lógica de los sistemas de propulsión híbridos. Se puede definir como una tecnología de propulsión donde todos los motores que proporcionan la potencia son motores eléctricos. La energía eléctrica para esos motores solo se almacena en baterías. Esto significa que se excluyen las opciones donde se excluye la energía eléctrica para los motores producida por generadores diesel. Las razones para utilizar un sistema de propulsión totalmente eléctrico son comparables a las de la opción híbrida. En primer lugar, se trata de la

---

<sup>25</sup> Gabriellii, C.H. and Jafarzadeh, S., 2020. Alternative fuels and propulsion systems for fishing vessels. SINTEF Rapport.

eficiencia energética de los motores eléctricos y de toda la cadena de suministro de energía para proporcionar la electricidad. Además, como se mencionó anteriormente, los motores eléctricos son mejores para lidiar con condiciones de carga variables.

Por lo tanto, los motores eléctricos manejan mejor los picos de potencia y las fluctuaciones de carga que los motores de combustibles fósiles convencionales. La eficiencia energética y la buena adaptación de la fuente de alimentación a las condiciones de carga conducen a una emisión de carbono significativamente menor. Sin embargo, al decir esto, se refiere a las emisiones well-to-tank, porque las emisiones del tank-to-wake de la embarcación eléctrica son iguales a cero de todos modos, ya que no se queman combustibles que contienen carbono a bordo de la embarcación.

El potencial de reducción de la navegación marítima totalmente eléctrica a nivel mundial oscilan entre el 16 % y el 77 %.

Los buques portacontenedores, gaseros, petroleros, carga general y ro-ro, la tecnología totalmente eléctrica podría ser una opción. Tienen suficiente espacio para almacenar las baterías y podrían hacer frente a su peso. Sin embargo, en este momento no son realistas debido a un rango de operatividad demasiado pequeño debido a la tecnología de batería actual. Esto también significa que la instalación de baterías actualmente ocuparía demasiado espacio y ese peso sería demasiado alto. Cuando la tecnología evolucione y las baterías obtengan una mayor densidad de energía, la tecnología podría ser realista para esos buques.

Para embarcaciones como dragas y remolcadores esta tecnología tiene las mismas limitaciones. El peso y el espacio que van de la mano con el uso de baterías para propulsar la embarcación únicamente con energía eléctrica, constituyen un gran obstáculo en este momento. Para estos tipos de embarcaciones, ciertamente tampoco será aplicable en el futuro, porque las embarcaciones son demasiado pequeñas para almacenar todas las baterías necesarias, incluso si la tecnología mejora.

Para barcos de estuario y barcos de pesca se puede argumentar lógicamente que la tecnología no sería realmente aplicable para estos buques, debido al espacio limitado disponible. Actualmente, las pequeñas embarcaciones de recreo serán el único tipo de embarcación del estudio que podría adoptar esta tecnología sin muchos problemas. Esas embarcaciones son pequeñas, tienen poco peso, no realizan viajes largos e ininterrumpidos y no requieren mucha potencia. Por lo tanto, no se necesitarán muchas baterías, lo que debilita la preocupación por el peso y el espacio. Para las embarcaciones de recreo más grandes, son válidos los mismos problemas que para todas las demás embarcaciones discutidas anteriormente.

Además de las preocupaciones sobre la densidad energética de las baterías, la falta de energía en tierra y de infraestructura de carga también está obstaculizando la adopción de la tecnología. Por el momento, la tecnología solo será aplicable en embarcaciones, y más precisamente en embarcaciones de recreo, que tienen una capacidad flexible, no están en funcionamiento de forma permanente o donde el peso extra no es realmente una preocupación. Cuando la investigación sobre nuevas y mejores tecnologías de baterías comience a dar sus frutos, y las inversiones en

infraestructura se amplíen para que se pueda desarrollar una economía de escala, la tecnología se convertirá en una mejor opción para muchas partes interesadas.

#### 4.5.6. Análisis de costos de las soluciones tecnológicas.

Los costes de propiedad y explotación de un buque varían considerablemente en función de las rutas, los tipos de buques, las dimensiones y la antigüedad. A fin de ilustrar los elementos más representativos del sector marítimo, tomaremos como ejemplo la estructura ilustrativa de costes de tres tipos de buques: granelero, petrolero y portacontenedores, los que representan la mayor parte de las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector (ver *sección 1.1, Tabla 4*) y además, son los más representativos en cuanto al tamaño de la flota, según las estadísticas de flota publicadas por UNCTAD (2019)[56].

Para todos los tipos de buques, los principales componentes de los costes son:

- Costes de capital, es decir, los costes asociados a la propiedad del buque, con carácter permanente o temporal.
- Costes de explotación, es decir, los costes asociados a la explotación del buque, pero no a las travesías que realiza. Los costes de explotación varían considerablemente entre buques, flotas y empresas. Las partes interesadas reconocen que la optimización de los costes operativos es una de las estrategias de gestión de costes más utilizadas para las flotas más grandes.
- Los gastos de viaje son los gastos variables asociados a los viajes o viajes que realiza un buque determinado en un año. Estos costes serán nulos para un buque no utilizado en un año determinado.

Expresaremos los costes en millones de USD al año, las métricas más utilizadas a escala mundial, y asumiremos un precio medio del combustible de 481 USD/tonelada por debajo de los precios medios Brent de 50 a 55 USD/barril en 2015-2019 [56].

En el caso de los buques relativamente nuevos, por término medio, los costes de capital representan entre el 15% y el 25% de los costes totales de los buques, mientras que los costes de explotación representan entre el 10% y el 25% de los costes. Los gastos de viaje son, con mucho, el componente de costes más importante para todos los tipos y tamaños de buques, debido al consumo de combustible, y representan entre el 60% y el 70% de los costes totales anuales.

La antigüedad del buque es un factor determinante de los costes de capital y de combustible ya que, en general, los buques se deprecian más rápidamente al principio de su vida útil y los buques más nuevos son más eficientes.

Para evaluar detalladamente el potencial de reducción de GEI de los diferentes combustibles alternativos, sus costes y las emisiones de GEI asociadas a sus diferentes vías de producción, se debe tener en cuenta las limitaciones prácticas de estos combustibles en términos de almacenamiento, viabilidad comercial e infraestructura, así como sus costes de capital y otros impactos medioambientales. Un obstáculo fundamental para la generalización de los combustibles

alternativos con bajas emisiones de carbono (con la posible excepción del GNL) son sus costes de producción considerablemente más elevados y, por tanto, su precio para el usuario final, en comparación con el combustible marítimo convencional. Para que los combustibles alternativos puedan competir comercialmente con los combustibles convencionales, habrá que abordar esta diferencia de costes.

En el caso de muchos de los combustibles propuestos (por ejemplo, amoníaco verde/azul e hidrógeno, metanol verde y biofuel), sus emisiones de GEI dependen de la proporción de energías renovables en la electricidad utilizada en su producción. En la actualidad no está clara la evolución exacta de la electricidad renovable en las fuentes de que disponen los productores de combustible (ya sea a partir de la red nacional o de su propia generación). Para lograr el máximo potencial de reducción de las emisiones de GEI, es importante que la electricidad utilizada en su producción sea 100% renovable; el combustible producido con otras fuentes de electricidad puede no ser realmente «verde».

En el 2017, la cuota global estimada de energías renovables en el consumo total de energía final fue del 10,6% (REN21, 2020) [56]. De cara al futuro, las proyecciones globales de cuota de energía renovable para el 2050 varían. La proporción exacta dependerá en gran medida de la geopolítica, las políticas nacionales y la oferta.

El suministro de electricidad renovable (combinación de la red) y el coste también variarán de una región a otra, lo que repercutirá en las rutas de combustible específicas. El carácter internacional del transporte marítimo significa que los combustibles pueden producirse en todo el mundo. De esta manera, la región en la que se produce un combustible repercute en su potencial de reducción de carbono.

Además, al menos en el caso de las plantas piloto iniciales de combustibles ecológicos, los emplazamientos en los que se construirán las plantas pueden seleccionarse en función de la disponibilidad local de materias primas y electricidad renovable. Si esto continúa a medida que aumenta la producción para satisfacer la demanda futura, podría aumentar la necesidad de transportar combustibles marítimos desde las instalaciones de producción hasta los puertos. El consumo adicional de energía y los costes asociados a este transporte pueden reducirse situando las instalaciones de producción más cerca de las principales rutas marítimas (y de los principales puertos marítimos), siempre que ello no suponga un aumento significativo de los costes de transporte de la materia prima a la instalación de producción.

Además del coste y la disponibilidad de electricidad renovable, las características del combustible son importantes para determinar la idoneidad de un combustible y, por tanto, su absorción. Por ejemplo, los combustibles con menor densidad energética requieren un mayor volumen de almacenamiento para una determinada cantidad de energía.

Los precios del GNL son similares a los de los combustibles convencionales (por unidad de energía). Los costes de capital y los costes operativos siguen siendo significativamente más elevados para el GNL que para los combustibles convencionales.

Para GLP, entre mayo de 2020 y febrero de 2021, el precio del propano ha oscilado entre 0,33 y 0,92 dólares por galón (Trading Economics, 2020) [56], lo que equivale aproximadamente a 160 y a 440 dólares por tonelada<sup>26</sup>.

El amoniaco: el costo de construir una planta de amoniaco verde varía en función de la capacidad. Se espera que la próxima planta de amoniaco a base de hidrógeno de Air Products cueste 5.000 millones de dólares (Bloomberg Green, 2020).

En el caso del hidrógeno, las proyecciones sugieren que los costos de capital de las plantas de producción se reducirán con el tiempo, lo que conducirá a menores costos de combustible. Se ha pronosticado que el gasto de capital de producción de hidrógeno verde disminuirá a 840 USD\$/kW entre 2020 y 2030, con la posible disminución a 200 USD\$/kW entre 2040 y 2050 (IRENA, 2019) [56].

El metanol: entre 2017-2020 los precios globales variaron de \$220 a \$500 USD por tonelada. El valor mínimo de \$220 fue durante la pandemia COVID-19 (MMSA, 2020). El costo de inversión para una planta de metanol varía entre 200-1200 €/kW de combustible. Aproximadamente, los costes de un buque RoRo de nueva construcción y de un buque RoRo de metanol modernizado de 24 MW de potencia y capacidad de tanque para 3 días de navegación (IMO, 2016) serían: Costo de actualización de \$10,5 m (costo total de metanol adicional); Costo adicional de nueva construcción: \$5,6 m (costo total de metanol adicional)

Para el Biofuel que se produce a partir de aceites vegetales, grasas animales o aceites de cocina usados por transesterificación, y tiene propiedades similares al gasóleo convencional, el precio del 2020 por tonelada métrica se ha estimado en ~ \$1180 / tonelada.

El Biofuel conocido como ésteres y ácidos grasos tratados con hidrógeno, libre de azufre y compuestos aromáticos, que generalmente consiste en aceites vegetales o grasas animales que se han sometido a hidroprocesamiento y refinación, en presencia de un catalizador, el precio del 2020 es de ~ \$ 1600/tonelada según S&P Global Platts.

Baterías: El costo de la batería ha sido previamente una gran barrera para los barcos eléctricos. Para un barco transoceánico de batería pura, el costo de la batería sola con la tecnología actual podría exceder el costo del resto del barco. Sin embargo, con el desarrollo de la tecnología de baterías y con la escala, los precios de las baterías están disminuyendo rápidamente debido a la demanda de los sectores automotriz y de electrónica de consumo (American Bureau of Shipping, 2019), las baterías de iones de litio se han reducido a la mitad desde el 2016. Al igual que la propia batería, las instalaciones a gran escala en barcos también requieren hardware y software de control de batería, integración de sistemas, gestión térmica y electrónica de potencia. Estos costos suelen ser

---

<sup>26</sup> Nota: el precio de mercado del GLP varía y depende de la presión y la temperatura.

significativos, ya que el costo de integración del sistema de batería a veces equivale al costo del propio sistema de batería (American Bureau of Shipping, 2019) [56].

Pilas de combustibles: el combustible utilizado para alimentar las pilas de combustible suele ser hidrógeno, pero se pueden utilizar otros combustibles. Es probable que las celdas de combustible necesiten una capacidad eléctrica de batería significativa para operar con éxito en un sistema instalado en un barco, lo que permite la variación de la carga. Las celdas de combustible también requieren sus propios sistemas y equipos de almacenamiento. El costo sigue siendo una barrera clave para el uso de celdas de combustible y, hasta la fecha, los sistemas de celdas de combustible siguen siendo significativamente costosos<sup>27</sup>.

La eficiencia de los nuevos buques ha mejorado sustancialmente desde los años ochenta, impulsada principalmente por el coste del combustible y las tarifas de flete. No obstante, sigue habiendo medidas de diseño de los buques que ofrecen un mayor potencial de reducción de los GEI, mediante la reducción de la resistencia de los buques y del consumo de combustible. Las medidas no solo tienen por objeto optimizar la fase de diseño y construcción de nuevos buques, sino que algunas también pueden aplicarse como adaptaciones para mejorar el diseño existente.

El potencial de reducción de GEI para estas medidas, así como los costes asociados por buque se resumen a continuación. Estas medidas son en su mayoría tecnológicamente maduras y ya se han aplicado ampliamente con una gran penetración en el mercado. La magnitud en que estas medidas adicionales reduzcan las emisiones dependerá del diseño de los buques existentes.

En la Tabla 9 (y en las medidas similares posteriores), las estimaciones de costes se basan en la información relativa a la aplicación de la tecnología en el 2020.

Actualmente existen en el mercado del transporte marítimo varias tecnologías de propulsión. Las hélices de paso fijo son actualmente el tipo más común y ocupan la mayor proporción de la flota marítima. Sin embargo, en la *sección 3.5.3* anterior hemos visto que el aprovechamiento de tecnologías de propulsión alternativas, como las hélices de gran superficie, las hélices contra-rotativas (CRP) y los propulsores en cápsulas, podría dar lugar a mejoras de la eficiencia energética y a reducciones de las emisiones de GEI.

---

<sup>27</sup> Como referencia: Se proyecta que el costo estimado (2020) de un sistema de celda de combustible de membrana electrolítica de polímero (PEM) automotriz de 80 kW netos sea de \$76/kW neto cuando se fabrique a un volumen de 100 000 unidades/año. Estos costos representan el costo del sistema de energía para lograr 8000 horas de operación en carretera (el costo ajustado por durabilidad), una vida útil del sistema habilitada a través de una combinación de diseño de componentes, metodología operativa y sobredimensionamiento de la pila. Disponible en: B. D. James, J. M. Huya-Kouadio, and C. Houchins, "Final Report: Mass Production Cost Estimation of Direct H2 PEM Fuel Cell Systems for Transportation Applications 2020," Strategic Analysis Inc., Arlington, VA (United States), [Preprint] (January 2021).



Medida de diseño del buque	Breve descripción	Potencial de reducción de GEI (%)	Costo de la medida (USD \$) por buque
Tamaño óptimo del buque	Los buques grandes tienden a ser más eficientes en combustible, ya que tienen una menor resistencia total al casco.	~9%	Incluido en el coste total de nueva construcción
Peso de construcción.	Los buques más ligeros son más eficientes en combustible	~9%	
Dimensiones del casco (optimización de la forma)	La forma y dimensión de los cascos impactan la resistencia del buque. Se utiliza el modelado computacional de dinámica de fluidos.	4 – 8%	\$150 000 a \$500 000
Rediseño del bulbo de proa	El diseño inicial del buque a veces se optimiza para un perfil de funcionamiento diferente al perfil de funcionamiento del buque en el mar. El rediseño de un nuevo arco de bulbo puede permitir ahorros de combustible con diseños de arco a medida.	3% – 5%	\$100 000 con un costo de material adicional de \$250 000 a \$700 000 según el tamaño
Recubrimientos del casco	Los recubrimientos previenen/reducen la acumulación de depósitos de desechos y contrarrestan el crecimiento orgánico, reduciendo la fricción superficial.	0.5 – 5%	\$30 000 a \$500 000
Lubricación por aire	Bombeo de aire comprimido a través de agujeros en la parte inferior del casco del buque. El aire arrastrado reduce la resistencia a la fricción entre el casco y el agua, reduciendo la demanda de potencia de propulsión.	7%	\$130 000 a \$ 3 380 000

**Tabla 9: Resumen de las medidas de diseño de los buques. Fuente: [56]**

Los dispositivos de mejora de la propulsión son dispositivos que pueden ayudar a mejorar la hidrodinámica del buque. Gran parte de su eficacia depende del diseño original del buque, la geometría del casco y el perfil operacional del buque. Si se ha optimizado el diseño de los buques existentes, el ahorro adicional derivado de estas medidas probablemente será inferior a los valores notificados. Además, la aplicación conjunta de múltiples tecnologías (cuando sea factible) puede no producir la mejora total obtenida sumando las correspondientes a las diferentes tecnologías.

En la Tabla 10 se resume el potencial de reducción de GEI y los costes. Las medidas de diseño de las hélices son ampliamente aplicables a diferentes tipos de buques y ya se aplican ampliamente.

Tecnología de propulsión / adaptaciones	Breve descripción	Potencial de reducción de GEI (%)	Costo de la medida (USD \$) por buque
El concepto de hélices de área grande	Consiste en mover la hélice hacia la popa detrás del casco para permitir que se utilicen diámetros de hélice más grandes.	2-5%	\$630 000 a \$2 690 000
Hélices CRP.	La tecnología CRP mejora la eficiencia del combustible porque la hélice de popa recupera la pérdida de energía del flujo rotacional detrás de la hélice delantera.		
Propulsores Podded.	Este dispositivo de propulsión es externo al casco del buque y alberga la capacidad de propulsión de la hélice.	Hasta el 15%	\$2 000 000 a \$3 000 000
Ducted propeller	Los conductos/toberas de hélice (también conocidos como boquillas Kort) consisten en un conducto anular que rodea la hélice (que funciona dentro del conducto). Al equipar la hélice con una boquilla no giratoria, se mejora la eficiencia de la hélice.	0.5-5%	\$525 000 a \$575 000
Pre-swirl	A menudo se producen pérdidas de energía rotacional sustanciales en la corriente de deslizamiento de la hélice. Los Pre-swirl están montados delante de la hélice. Los Pre-swirl previos al remolino optimizan el flujo en la hélice y evitan pérdidas de energía.	Hasta el 10%	\$250 000 a \$300 000
Post-swirl devices. (Aletas y bulbo del timón)	Las aletas y el bulbo del timón pueden recuperar parte de las pérdidas de energía asociadas mediante el diseño personalizado del sistema de propulsión y dirección.	0.5-2%	\$100 000 a \$150 000 (aleta) \$250 000 a \$300 000 (bulbo)

**Tabla 10 Resumen de tecnologías alternativas de propulsión y de adaptación. Fuente: [56]**

En la actualidad, la gran mayoría de la flota marítima mundial funciona con motores de ciclo diésel, bien de dos o cuatro tiempos, que funcionan con fuelóleo pesado (HFO) (a partir de 2020 normalmente una variante muy baja en azufre para cumplir el Reglamento OMI 2020) o con un combustible destilado como el gasóleo marino (MDO). Las «nuevas» tecnologías con potencial para mejorar la eficiencia de los motores o el consumo global de energía del buque ya se aplican en los motores (y algunas contribuyen a reducir otros contaminantes, como el NO<sub>x</sub>, más que el CO<sub>2</sub>).

Los fabricantes de motores están realizando importantes esfuerzos para desarrollar motores compatibles con combustibles alternativos como el hidrógeno y el amoníaco (los motores de estos combustibles no se incluyen en la Tabla 11, ya que las reducciones de emisiones se logran gracias a las características del combustible y no a una mayor eficiencia). Otros desarrollos también están en marcha para abordar el problema del deslizamiento de metano de motores alimentados con GNL, incluyendo sistemas de reciclaje de gases de escape y tratamientos posteriores de gases de escape.

Diseño de propulsión / tecnología	Breve descripción	Potencial de reducción de GEI (%)	Costo de la medida (USD \$) por buque
Mejora del sistema de inyección de combustible	Cambios en el diseño y los parámetros de control del inyector de combustible (por ejemplo, presión, temporización) para mejorar la mezcla del combustible con el aire; ayuda a controlar las emisiones contaminantes	--	--
Híbrido diesel-eléctrico	Configuración del motor en la que el motor diésel acciona un generador para producir electricidad. La propulsión del buque se logra entonces mediante motores eléctricos que impulsan múltiples hélices. Puede contribuir a mejorar la flexibilidad de determinadas categorías de buques (por ejemplo, transbordadores), pero en general menos eficientes que los sistemas de propulsión directa en categorías clave de buques (petroleros, graneleros, portacontenedores) debido a múltiples procesos de conversión de energía.	--	--
Cierre temprano de la válvula de admisión	También conocido como motores de ciclo Miller. El cierre anticipado de la válvula de admisión del cilindro reduce el trabajo de bombeo necesario para comprimir el aire en el cilindro, pero la apertura normal de la válvula de escape permite mantener toda la carrera de potencia. La turboalimentación de alta presión se utiliza para recuperar toda la potencia del motor.	--	--
Recuperación de calor residual (WHRS)	Extracción de energía (como calor, o electricidad mediante turbinas de vapor o turbogeneradores) para reducir el uso de sistemas de energía auxiliares a bordo durante los viajes (y, por tanto, sus emisiones adicionales). Parte del calor residual ya se utiliza para calentar el combustible a bordo y la cantidad de calor residual disponible se reduce significativamente en los ajustes de potencia más bajos utilizados para el vapor lento.	3% - 8%	\$5,000,000 a \$9,500,000

Tabla 11: Resumen de las tecnologías de motores. Fuente: [56]

La captura de carbono (CC), definida como la recogida, transporte y eventual almacenamiento o reciclado de las emisiones de dióxido de carbono, se ha considerado como una forma de reducir las emisiones de los procesos de producción de CO<sub>2</sub> existentes. Aunque la mayoría de los debates giran en torno a las soluciones de CC fijas y terrestres (un campo en el que ya hay muchas aplicaciones comerciales y muchas más en estudio), últimamente se ha debatido el potencial de la CC a bordo como forma de reducir las emisiones del transporte marítimo.

La CC a bordo puede ayudar a la industria marítima a alcanzar sus objetivos de reducción de CO<sub>2</sub>, pero el concepto no está lo suficientemente desarrollado en este momento como para tener una utilidad práctica a corto plazo. Aunque se han presentado varios conceptos técnicos teóricos y costes estimados, por lo que sabemos, sólo se han previsto pocos esfuerzos para pasar a la fase del prototipo que probará la posibilidad de aplicar CC criogénico en el sector marítimo. Además, la CC a bordo tiene muchos retos asociados con ella. Entre ellos figuran los costes de capital y de explotación, las necesidades de espacio y energía (puede esperarse un aumento del consumo de

combustible de hasta un 20%) y la eficacia en la captura de CO<sub>2</sub> (puede alcanzar el 100% pero no se ha comprobado; el 80% es una expectativa más realista).

Tecnología	Breve descripción	Potencial de reducción de GEI (%)	Costo de la medida (USD \$) por buque
Captura de carbono	Recogida a bordo de las emisiones de CO <sub>2</sub> procedentes de la combustión de combustibles que contienen carbono	Un potencial de captura de carbono del 80%. Puede acompañarse de un aumento del consumo de combustible de hasta un 20%.	Hasta \$27,000,000 para buque de tamaño medio.

**Tabla 12: Resumen de la reducción de las emisiones de captura de carbono y el costo. Fuente: [56]**

Además de la viabilidad de implantar sistemas de captura de carbono a bordo de los buques, la adopción de esta tecnología dependerá también de la disponibilidad de instalaciones de manipulación en los puertos y de las posibilidades de almacenamiento o utilización subsiguientes. Actualmente se están llevando a cabo proyectos para establecer instalaciones de recepción y transporte a largo plazo del CO<sub>2</sub> capturado, pero se dispone de muy poca información sobre los posibles costes, de capital y de funcionamiento, de las instalaciones para recibir y transportar el CO<sub>2</sub> capturado.

Las fuentes de energía alternativas reducen las emisiones de GEI al reducir la demanda de potencia del motor principal. En la Tabla 13 se resumen dichas tecnologías de energía alternativa. La mayoría de las tecnologías alternativas de propulsión y asistencia a la potencia aún no se aplican ampliamente.

Las medidas de asistencia a la energía eólica requieren la integración con software meteorológico/flota/logística y optimización de viajes, para maximizar la reducción global del consumo de combustible para viajes. El ahorro de combustible que se puede lograr con las tecnologías de asistencia eólica depende del diseño del buque, la velocidad de operación y las velocidades y direcciones del viento experimentadas (Rehmatulla et al, 2017) [56]. En general, las medidas de asistencia eólica pueden aplicarse con velocidad lenta porque la propulsión eólica es más eficaz a baja velocidad.

Tecnología de energía alternativa	Breve descripción	Potencial de reducción de GEI (%)	Costo de la medida (USD \$) por buque
Velas	Instalaciones fijas en forma de vela flexible, vela rígida o turbosail.	6%	\$300.000-\$1.000.000 (instalación y mástil)
Rotores Flettner	Los rotores cilíndricos colocados en la cubierta se acoplan utilizando un motor eléctrico para capitalizar el efecto Magnus	10-30%	\$1,000,000 – \$3,000,000 (para la entrega típica con múltiples rotores; un solo rotor cuesta \$400,000 a \$950,000)
Cometas de remolque	Cometas dinámicos instalados en la proa de un barco para aprovechar los vientos de mayor altitud.	1-5%	\$280,000 -\$2,590,000*
Paneles solares	Uso de paneles solares convencionales en techos superiores para reemplazar parte de la energía generada por los motores auxiliares.	1,25% (del consumo de combustible del motor auxiliar**)	~\$ 1,400,000
Suministro de energía en tierra.	La energía eléctrica en tierra se suministra a un buque mientras está atracado, lo que permite que el buque apague sus motores auxiliares.	50-100%*	\$50.000 – \$750.000***
<p>* Esta reducción es en puerto solamente y se refiere a la reducción de los motores eléctricos a bordo.                  ** Aunque la reducción global de GEI en la práctica puede ser menor (~0,1%).                  *** Este coste no incluye los costes de los puertos de instalación de la conexión y el suministro de energía.</p>			

**Tabla 13: Resumen de las medidas de asistencia energética. Fuente: [56]**

Las nuevas medidas operativas y de optimización de los viajes, junto a las ya existentes, como la reducción de la velocidad, ofrecen posibilidades de reducción de los gases de efecto invernadero. En la Tabla 14 se resumen el potencial de reducción de GEI y los costes de estas medidas.

Los resultados de los análisis de las emisiones indican que la ambición de la OMI puede cumplirse (y, de hecho, superarse) con una gran confianza en las hipótesis descritas, es decir, que si los combustibles se cambian según lo descrito, existe una gran confianza en las emisiones resultantes de su utilización, aunque, naturalmente, existe una menor confianza en los costes calculados. Además de la incertidumbre inherente a las proyecciones de los precios de los carburantes, los costes reales serán sensibles a las decisiones que se adopten en el futuro (por ejemplo, una elevada utilización de un tipo de carburante alternativo podría dar lugar a precios de diferentes tipos de carburantes significativamente diferentes de los previstos en el presente estudio, que se sustentan en proyecciones basadas en un mercado más equilibrado).

Tecnología	Breve descripción	Potencial de reducción de GEI (%)	Costo de la medida (USD \$) por buque
Reducción de la velocidad (10%)	La reducción de velocidad o «vapor lento» es una práctica operativa que reduce el consumo de combustible (y, por tanto, los costes y las emisiones de los buques construidos antes del 2010)	10-15%	No hay costos de inversión, pero puede afectar a los ingresos totales debido a un mayor tiempo de navegación.
Reducción de la velocidad (20%)		18-28%	
Reducción de la velocidad (30%)		24-38%	
Logística portuaria avanzada	Gracias a una planificación flexible, una mejor colaboración, el intercambio de datos en tiempo real y la digitalización de los flujos de carga, una interfaz buque-puerto más fluida puede reducir significativamente el tiempo de espera de los buques.	Hasta el 1%	
Optimización de la utilización de la capacidad de los buques	Esta medida se basa en la capacidad de equilibrar la oferta y la demanda. La optimización de la utilización de la capacidad reduce el coste por unidad transportada y ahorra emisiones por tonelada-milla.	0-30%	
Pilotos automáticos avanzados	Minimiza los movimientos desde el timón, lo que de otro modo crea un mayor arrastre al casco y, en consecuencia, aumenta la resistencia del buque.	0,25-1,5%	Sin coste de implementación asumiendo que el piloto automático ya está instalado.
Rutas meteorológicas	Las rutas meteorológicas y la planificación de viajes minimizan la exposición al agua no protegida.	0-5%	\$25 000
Navegación autónoma	La rápida evolución de la tecnología hace que las operaciones sin tripulación sean cada vez más posibles.	Hasta un 6%	(faltan datos fiables sobre los costes de capital por buque)
Gestión de la demanda de energía p. ej. iluminación	Cada equipo y maquinaria a bordo consume energía y puede evaluarse individualmente para optimizar la eficiencia energética y posiblemente sustituirse por modelos de mayor eficiencia.	0,25-5%	\$100 000* en comparación con las instalaciones de iluminación tradicionales
Mediciones de la eficiencia del motor	La medición de la eficiencia del motor principal permite una mejor gestión de la potencia del motor/motores.	Hasta un 5%	\$20 000- \$75 000
Limpieza del casco	La limpieza a fondo del casco del buque de forma regular puede mejorar el acabado superficial, reducir la resistencia y mejorar la eficiencia del combustible.	1-5%	\$5 000 \$50 000
Pulido de limpieza de la hélice	Limpieza y pulido de la hélice regularmente puede mejorar el acabado superficial y, por lo tanto, la eficiencia de la hélice.	3-4%	\$ 4.000 a \$ 8.000

\*Se refiere al costo adicional de 100 000 dólares (USD) en comparación con las instalaciones tradicionales de alumbrado en buques normales y de 200 000 a 1.000.000 dólares (USD) en buques de pasajeros y cruceros.

Tabla 14: Resumen de las medidas operativas de los buques. Fuente: [56]

## 4.6. Conclusiones del Capítulo 4.

- *Para alcanzar la reducción de las emisiones en un 40% en toda la flota para el 2030 acordado en la Estrategia Inicial, en las medidas a corto plazo se introducen nuevos requisitos con el fin de medir y evaluar la eficiencia energética de todos los barcos y así establecer los valores y logros obtenidos.*
- *El Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI) es una medida técnica importante que indica el rendimiento estimado del buque de nueva construcción en términos de eficiencia energética. Un valor elevado del índice caracteriza a un buque con una baja eficiencia energética.*
- *El EEDI obtenido para los buques nuevos se calcula mediante la relación entre la suma de las Potencias de los motores principales y auxiliares por el consumo de combustible (considerando las tecnologías innovadoras de eficiencia energética para la generación de electricidad y para la propulsión), y la capacidad de carga del buque por la velocidad de referencia. Se expresa en  $gCO_2$ /tonelada-milla.*
- *El Índice de Eficiencia Energética de los buques existentes (EEXI), es una medida técnica aplicada a los buques ya existentes de navegación internacional de más de 400 GT. Mide la eficiencia energética del buque en  $gCO_2$ /tonelada-milla y se calcula aplicando los parámetros de las Directrices sobre el cálculo del EEDI.*
- *El Plan de Gestión de la Eficiencia Energética de los Buques (SEEMP) es una medida operativa obligatoria para reducir las emisiones y mejorar la eficacia de los buques existentes de arqueo bruto superior a 400 GT. Debe elaborarse como un Plan específico para cada buque.*
- *La Parte I del SEEMP tiene por objeto incrementar la eficiencia energética de un buque en cuatro fases: planificación, implantación, vigilancia y autoevaluación y mejora.*
- *La Parte II del SEEMP describe la metodología que se utilizará para recopilar los datos de los buques de igual o superior a 5000 GT, sobre el consumo anual de fueloil, la distancia recorrida, las horas de navegación y otros datos prescritos, en un formato normalizado elaborado por la Organización.*
- *Mediante el indicador de la intensidad de carbono (CII), que se aplica como medida operativa a los buques de igual o superior a 5000 GT, se puede estimar el factor de reducción anual necesario para garantizar la mejora continua de la intensidad de carbono operativa y así lograr la reducción de las emisiones de  $CO_2$  por trabajo de transporte en al menos un 40% para el 2030, en comparación con 2008.*
- *En función del indicador de la intensidad de carbono operacional anual obtenido, se indicará un nivel de funcionamiento muy superior, superior, moderado, inferior o muy inferior, y se asignará una etiqueta (A, B, C, D y E) que clasifique la eficiencia energética operacional del buque.*

- *Las acciones más significativas que contribuyen al consumo eficiente de combustible y a la descarbonización del transporte marítimo pueden ser:*
  - *Uso de combustibles y energía alternativos: GNL, biocombustibles avanzados, combustibles sintéticos (hidrógeno y amoníaco), pilas de combustibles, electricidad y propulsión híbrida, asistencia eólica y energía solar.*
  - *Acciones de tipo operacionales: disminución de la velocidad, dimensiones del buque y capacidad de utilización, interface buque-puerto y energía en tierra.*
  - *Acciones de tipo tecnológicas: Mejoras de diseño, recuperación de la energía de la hélice y dispositivos de mejora de la propulsión, recuperación de la energía del motor y postratamiento de los gases de escape, revestimiento del casco y lubricación por aire, peso ligero y optimización de las dimensiones principales.*
- *Aunque una serie de combustibles y fuentes de energía alternativos tienen emisiones inferiores o nulas cuando se utilizan para la propulsión de los buques, pueden producirse emisiones en las fases anteriores del proceso de producción. No todas estas opciones han alcanzado todavía la madurez del mercado, debe tenerse en cuenta la disponibilidad de la materia prima, la densidad energética y espacio de almacenamiento a bordo, la infraestructura para el bunkering, las certificaciones, la seguridad en las operaciones, costes, etc.*
- *Todas estas tecnologías están disponibles en el mercado, pero no todas las opciones pueden aplicarse como retroadaptación. Cabe señalar que los potenciales de reducción varían según el tipo de buque, las condiciones meteorológicas o del motor y los perfiles operacionales.*
- *Los costes totales son una combinación de los costes de capital de los buques, los costes de combustible y otros costes de explotación de los buques. Éstos se calculan para cada uno de los conjuntos de combustible y tecnología y para la base de referencia. Las proyecciones de los costos del combustible presentan mayores incertidumbres que los demás elementos de los costos.*



# Capítol 5. Análisis de casos reales de buques con aplicaciones de soluciones tecnológicas.

La necesidad de reducir los costos de combustible y las emisiones es común para los propietarios y operadores de todo el mundo. Pero el cumplimiento de una estricta legislación ambiental se está convirtiendo en un requisito global.

Algunas empresas han considerado la necesidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, no impulsadas por las regulaciones, sino por las condiciones del mercado y los costos del combustible, han participado de forma proactiva en el desarrollo de tecnologías más ecológicas y han encontrado una razón clara para hacerlo. Las empresas noruegas por ejemplo, pretenden adquirir una ventaja como pioneras en el desarrollo de buques de carga con total autonomía eléctrica. El desarrollo del buque de carga Yara Birkeland, (actualmente en prueba) es una colaboración entre la empresa agrícola noruega Yara, la firma de tecnología marítima Kongsberg, DNV GL, Marin Teknikk diseño naval, el laboratorio de pruebas SINTEF Ocean, y las autoridades marítimas noruegas. Las ambiciones chinas en el sector de la tecnología limpia también están impulsando algunas de sus iniciativas innovadoras en el transporte marítimo, como el desarrollo de una barcaza interior totalmente eléctrica.

Otras empresas como el conglomerado suizo-sueco ABB, está expandiendo sus actividades de electrificación, robótica y automatización industrial hacia aplicaciones en el segmento marítimo, especialmente en la propulsión híbrida y la eficiencia optimizada de sistemas de energía eléctrica y pilas de combustible. Operando entre Helsingborg (Suecia) y Helsingør (Dinamarca), el HH Ferries Tycho Brahe y el Aurora se alimentan con la tecnología de baterías de ABB y se suministran mediante estaciones de carga automatizadas en tierra utilizando un robot industrial. El proyecto consiste en la conversión de los dos ferries diésel-eléctricos en los transbordadores totalmente eléctricos más grandes del mundo hasta la fecha.

La compañía Wärtsilä de Finlandia es pionera en tecnologías de combustibles sostenibles, tanto para combustibles de carbono neutro como cero: como biocombustibles, metanol, amoníaco y mezclas de hidrógeno. Al mismo tiempo que ofrece tecnologías que maximizan la eficiencia energética cuando se utilizan combustibles fósiles, la compañía también se está asociando para ofrecer tecnologías complementarias para la transformación hacia la descarbonización, y en ofertas digitales relacionadas con la optimización marina.

Los cargadores (propietarios de carga) piden cada vez más un mayor rendimiento medioambiental. Sobre la base de la demanda de los consumidores, los problemas de reputación y la presión de los inversores, los reguladores y las ONG, los propietarios de carga han elaborado estrategias para hacer más ecológicas sus cadenas de suministro y vigilar cada vez más sus emisiones de carbono.

Forma parte de una mayor conciencia y voluntad de reducir la contaminación, los desechos y el riesgo de peligros y derrames. Esta tendencia ha aumentado en los últimos años, como lo demuestra la creación de una serie de iniciativas industriales. Además de los problemas de cumplimiento, los agentes del sector también esperan aumentar su visibilidad y percibir una ventaja competitiva mostrando transparencia en el desempeño. En muchos casos, la adopción voluntaria de normas más estrictas y las eco-innovaciones también representan una ventaja de primer orden para las empresas.

## **5.1. Aplicaciones de la tecnología en casos reales de buques.**

Claramente, las necesidades exactas y los criterios operativos de los buques varían enormemente, según el tipo y el sector al que sirven. Por ejemplo, difícilmente se podría esperar que los requisitos para los remolcadores del puerto sean los mismos que para un crucero. Por lo tanto, una solución única que se adapte a todos los barcos probablemente signifique que no es del todo adecuada para ningún tipo de barco en particular.

Sin embargo, al utilizar un sistema de propulsión, por ejemplo, con múltiples modos de funcionamiento dentro de un mismo buque, se puede optimizar la respuesta del sistema a diferentes condiciones, mientras que la eficiencia del combustible y el rendimiento general de la embarcación mejoran notablemente. Simultáneamente, un mayor nivel de redundancia en comparación con las soluciones convencionales promueve una mayor seguridad.

El centro de todas estas ventajas es el aumento de la eficiencia operativa, que a su vez tiene un efecto beneficioso directo sobre el consumo de combustible y las emisiones de escape.

En la Tabla 15 se muestran algunos ejemplos de soluciones tecnológicas aplicadas a casos de buques reales y el porcentaje de ahorro energético alcanzado. La tabla se ha elaborado a partir de los reportes (período 2019 y 2020) de la base de datos del THETIS-MRV UE (2022), y los datos técnicos de tecnologías aplicadas publicados por la Compañía Wärtsilä [59].




Vessel	Vessel Type	Total fuel consumption (m tonnes)	Total CO <sub>2</sub> emissions (m tonnes)	Project Type	Technology	Saving	Technical efficiency (EEDI) gCO <sub>2</sub> /t·nm
NM Sakura (2015)	Bulk carrier	8144,07	3680.26	Newbuild	Gate rudder (crabbing)	14 %	4,05
Slot Amalienborg	Gas Tanker	--	--	Retrofit	Air lubrication: Silverstream system	5,1 %	--
Sapphire princess (2004)	Passenger Ship	30 207,6	95 287,69	Retrofit	Air lubrication: Silverstream system	>5%	26,6 (EIV)
Methane Patricia Camila (2010)	LNG Tanker	4902,6	13 672,69	Retrofit	Air lubrication: Silverstream system	6,6 %	13.26
Eco Livorno (2021)	Ro-Ro	--	--	Newbuild	Air lubrication: Silverstream system	4-7%	--
Sea Victoria (2021)	Ore Carrier (VLOC)	--	--	Newbuild	Air lubrication: Silverstream system	4-7%	--

**Tabla 15: Soluciones Tecnológicas aplicadas a buques reales. Fuente: Elaboración propia.**

Una manera inmediata de conseguir que tanto las embarcaciones nuevas como las ya existentes sean más eficientes y menos contaminantes es aplicar soluciones que estén prácticamente listas para su comercialización. La integración de las tecnologías de propulsión pueden ofrecer al mercado reducciones de significativas de potencia de propulsión y a su vez de consumo, al mismo tiempo que mantiene y mejora la eficiencia, siendo aplicable para buques de nueva construcción y para la flota ya existente.

Seguidamente se muestra para el caso de dos ejemplos de buques reales, el porcentaje de ahorro energético que puede obtenerse con cada solución tecnológica y con el conjunto, para dos alternativas de soluciones. diferentes.

<b>Vessel:</b> Alpha Ethos (2017) (IMO: 9723617)
<b>Vessel Type:</b> Bulk Carrier
<b>Total fuel consumption (m tonnes):</b> 4486,31
<b>Total CO<sub>2</sub> emissions (m tonnes):</b> 1672.07
<b>EEDI (gCO<sub>2</sub>/t·nm):</b> 3,55

Technology		Saving
Air lubrication: Silverstream system		5-9%
Pre-swirl stator: EnergoFlow		5-10%
Rudder/propeller combination that features a rudder bulb located behind the propeller hub: EnergoPac.		2-3%
Combined technologies		9-19 %
ROI*: 3,7 yr		
CO <sub>2</sub> : -5 000 ton/yr		








Air lubrication: Silverstream system		5-9%
Pre-swirl stator: EnergoFlow		2-5%
Gate rudder (crabbing)		5-10%
Post-swirl devices:		1-2%
Combined technologies		11-23%
ROI*: 4,1 yr		
CO <sub>2</sub> : -5 600 ton/yr		
*ROI: return on investment.		

Tabla 16: Conjunto de soluciones tecnológicas aplicadas al buque Alpha Ethos. Fuente: elaboración propia.

<b>Vessel:</b> Golar Crystal (2014) (IMO: 9624926)
<b>Vessel Type:</b> LNG Carrier
<b>Total fuel consumption (m tonnes):</b> 1627,55
<b>Total CO2 emissions (m tonnes):</b> 18654.34
<b>EIV* (gCO<sub>2</sub>/t·nm):</b> 7.62

Technology		Saving
Air lubrication: Silverstream system		5-9%
Pre-swirl stator: EnergoFlow		2-4%
Rudder/propeller combination that features a rudder bulb located behind the propeller hub: EnergoPac.		2-3%
Combined technologies		8-14%
ROI*: 3,4 yr		
CO <sub>2</sub> : -5 400 ton/yr		





Air lubrication: Silverstream system		5-9%
pre-swirl stator: EnergoFlow		2-3%
Gate rudder (crabbing)		5-10%
Post-swirl devices:		1-2%
Combined technologies		10-22%
ROI**: 2,7 yr		
CO <sub>2</sub> : -7800 ton/yr		
*Estimated Index Value.		
**ROI: return on investment.		

Tabla 17 Conjunto de soluciones tecnológicas aplicadas al buque Golar Crystal. Fuente: elaboración propia

Al poder cambiar de una fuente de energía convencional basada en motores a energía de almacenamiento eléctrico cuando se navega en puertos o cerca de centros de población, por ejemplo, se pueden superar las restricciones legislativas y se puede ahorrar combustible. Se espera ampliamente que las soluciones de propulsión híbrida representen un porcentaje significativo de todos los barcos contratados en los próximos diez años.

Otras propuestas de soluciones tecnológicas existentes ya en el mercado para descarbonizar el transporte marítimo son las de readaptación eléctrica presentada por Wärtsilä. [60]. Las propuestas se basan fundamentalmente en actualizaciones híbridas (incluyendo energía solar), generadores de eje e instalaciones de energía en tierra, basándose en el diseño de buques Ro-Pax, bulk carrier, general cargo y de servicios fundamentalmente.

Según el criterio de expertos de la compañía, la instalación puede tardar de 2 a 3 semanas y el proyecto incluye un tiempo de entrega de suministro de aproximadamente 9 meses. Aunque los costos de la instalación y de mantenimiento dependerán netamente del tipo de solución elegida y del tipo de barco, los expertos aseguran que el período de recuperación de la inversión puede ser de 2-6 años, y la vida útil restante del buque modernizado de 10-15 años como mínimo. Los modelos de soluciones tecnológicas se enumeran a continuación:

#### **1. Bulk Carrier, Propulsión: CPP Mecánica-Diesel Híbrido.**

Caso base: 2S con FPP

Solución Wartsila: 4S con Hybrid PTO/PTI

Principales Características y Beneficios de la Solución Integrada:

- Optimizado para los modos de funcionamiento del cliente
- Cero emisiones dentro y fuera del puerto y para operaciones de carga/descarga.
- Posibilidad de conectar otras fuentes de energía en el futuro.
- Propulsión redundante mediante utilización de PTI
- RPM variable en motores principales y frecuencia estable vía PTO
- Picos de carga reducidos para una carga estable del motor.
- Potencia instalada reducida: ~10%
- Horas de funcionamiento reducidas: ~12%
- Consumo de combustible reducido: ~15%
- Reducción total de CO<sub>2</sub>: ~20%

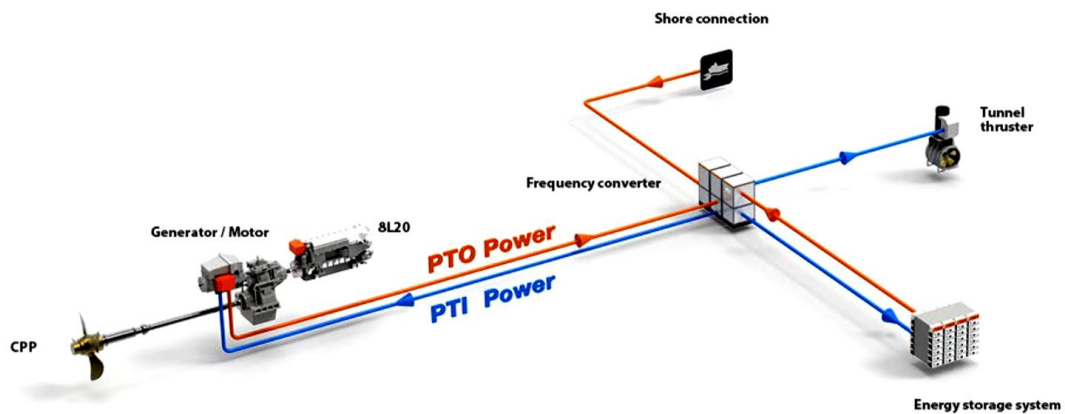


Figura 35: Esquema 2S con FPP. Fuente Wärtsilä (2021)

## 2. General Cargo. Propulsión: CPP Mecánica-Diesel Híbrido.

Caso base: 2S con FPP

Solución Wartsila: 4S con Hybrid PTO/PTI

Principales Características y Beneficios de la Solución Integrada:

- Disponibilidad del buque.
- Reducción del riesgo operacional.
- Proceso de construcción totalmente integrado.
- Aumento de la redundancia mediante la utilización de PTI.
- RPM variable en motores principales. Frecuencia estable y carga del motor gracias a PTO, convertidor activo y batería.
- Funcionamiento del motor a carga y rpm óptimas.
- Utilización de la energía en tierra.

## 3. 230M Ro-Ppax, Propulsión: Mecánica-Diesel Híbrido

Caso Base: 4 x 4S con CPP

Solución Wartsila: 4S con Hybrid PTO/PTI

Principales Características y Beneficios de la Solución Integrada:

- Carga del motor principal estable gracias al pico reducido ESS
- Reducción de las horas de funcionamiento en motores auxiliares con ESS+SG
- Listo para instalaciones futuras de carga en tierra.
- Reducción de las pérdidas de energía en TT gracias a la configuración VFD+FP
- Potencia instalada reducida: ~16%

- Horas de funcionamiento reducidas ~20%
- Reducción total de CO<sub>2</sub>: ~7%
- Reducción total de NO<sub>x</sub>: ~13%
- Ahorro total de Opex: ~8%

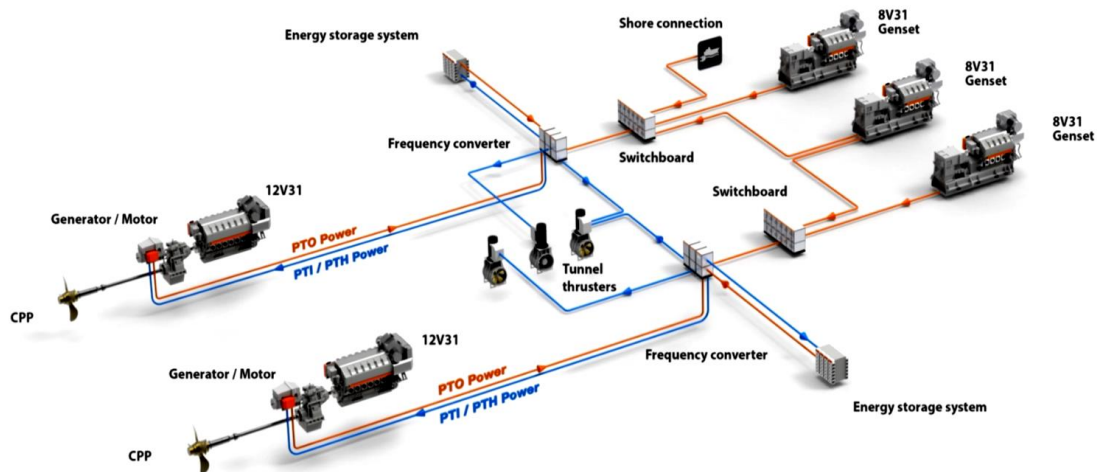


Figura 36: Esquema 4 x 4S con CPP. Fuente Wärtsilä (2021)

#### 4. Ferry 60 Car Passenger, Propulsión: Diesel-Hybrid

Caso Base: 4S Diesel Electric

Solución Wartsila: 4S Diesel Híbrido Eléctrico

Características y Beneficios Clave de la Solución Integrada:

- Ahorro de combustible demostrado mediante generadores de velocidad media y baterías
- Modo verde en puerto
- Cálculos de energía basados en el perfil de funcionamiento
- Horas de funcionamiento reducidas: ~20%
- Reducción total de CO<sub>2</sub>: ~3%
- Ahorro en el consumo: ~3%
- Total de ahorros Opex: ~5%



## 5. Fully Electric Ferries

Caso base: 4S DE o DM

Solución Wartsila: Completamente Eléctrico

Principales Características y Beneficios de la Solución Integrada:

- Funcionamiento eléctrico completo, cero emisiones
- Integración del buque y del sistema de tierra
- Optimización del consumo de energía
- Disponibilidad de servicios

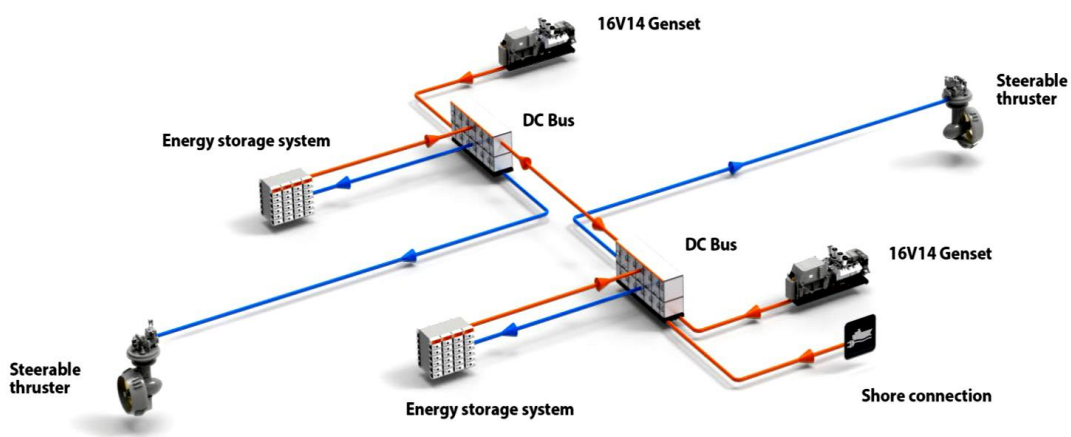


Figura 37: Esquema 4S DE o DM.Fuente Wärtsila (2021)

## 6. Shuttle Tanker (Gabarra Combustible). Propulsión: Hybrid Diesel- Electric

Caso Base : 2S con FPP

Solución Wartsila: 4S DFDE Híbrido con CPP

Características y Beneficios Clave de la Solución Integrada:

- Reducción de CO2 en más del 40%
- Reducción de NOx del 80%
- Las partículas de SOx y se eliminan casi por completo
- El uso de COV como combustible reduce el bunkering en un 46%
- Reducción de la potencia de la maquinaria en un 10%
- Reducción de las horas de funcionamiento de la maquinaria en un 29%
- Reducción del consumo global de combustible en un 10%

- Picos máximos de carga reducidos para una carga estable del motor

## 7. Añadir Pilas de Combustible y Baterías a un Crucero

- Adición de solución híbrida
- Baterías 1,6 MWh / 2 MW
- Pilas de combustible 2 x 2MW
- Sistema de gestión de la energía.

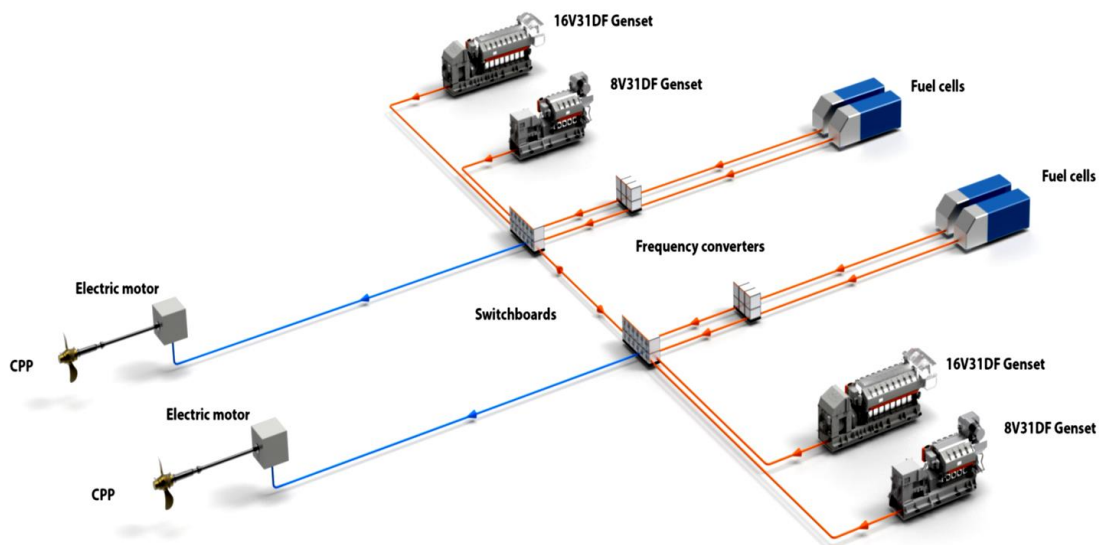


Figura 38: Esquema de solución híbrida. Fuente: Wärtsilä (2021)

Las propuestas anteriormente descritas constituyen soluciones estratégicas para alcanzar la meta de reducir en un 40% la intensidad de carbono para el 2030, y hasta un 70% conjuntamente con el 50% de emisiones de GEI para el 2050, para descarbonizar el transporte marítimo. Adicionalmente nos proporcionan las ventajas siguientes:

- Actualización o nueva compilación: Evaluar el potencial de nueva construcción o retrofit para la flota existente y la estrategia de la empresa.
- Mejoras eléctricas: La mejora eléctrica más sencilla de todas las nuevas construcciones hoy en día es un sistema de generador de eje PTO/PTI, que reduce EEDI y el consumo de combustible.
- Flexibilidad: Un sistema de propulsión diésel-eléctrico es el más flexible para futuros perfiles operativos y fuentes de energía
- Híbrido: Para muchos tipos de buques, un sistema de propulsión híbrido es ya una opción económicamente viable con un buen ROI y reducciones de emisiones.

- **Diseño futuro:** Todos los nuevos edificios deben estar listos para la energía en tierra, en la próxima década será obligatorio utilizar en muchos puertos alrededor del mundo.
- **Datos y Perspectiva:** Una unidad central de recopilación de datos supervisa todos los sistemas de los buques, lo que permite la vigilancia a distancia, el apoyo a distancia y el análisis del rendimiento.

## **5.2. Riesgos financieros asociados.**

En la actualidad, existe una prima de riesgo para aplicar tecnologías innovadoras y, por lo tanto, los armadores se enfrentan a grandes obstáculos para pasar a una flota más eficiente desde el punto de vista energético. Los armadores deben convencer a los financistas de que se recuperarán los costes adicionales de las tecnologías más ecológicas.

Para comprender y gestionar estos riesgos serán necesarias medidas que tengan en cuenta la integración de los riesgos asociados a la evolución de las reglamentaciones climáticas, por ejemplo, una importante demanda prevista de capital para la modificación de buques.

Existe una creciente conciencia sobre los activos abandonados relacionados con los combustibles fósiles, es decir, activos que han perdido su valor más rápido de lo previsto debido a la disminución del atractivo de los combustibles fósiles a la luz de los acuerdos sobre el cambio climático. Si bien la conciencia general entre los financiadores del transporte marítimo sobre los riesgos de activos varados relacionados con el clima está aumentando, solo muy pocos están gestionando activamente esos riesgos

A más largo plazo, las condiciones de los préstamos para buques sin emisiones de carbono podrían volverse más favorable que para los barcos propulsados por combustibles fósiles, considerando su riesgo de convertirse en activos varados una vez que se aplique una regulación más estricta.

El cambio climático afectará cada vez más a los activos fijos y la infraestructura, especialmente en los puertos y en las ciudades portuarias.

Las zonas costeras son particularmente vulnerables al aumento del nivel del mar y a las condiciones climáticas extremas, como tormentas y olas altas. Los peligros extremos y el aumento del nivel del mar pueden tener un impacto negativo en la provisión de bienes y servicios en las zonas costeras a través de eventos como marejadas ciclónicas e inundaciones asociadas, sumersión, intrusión de agua salada y erosión costera. En los puertos, los riesgos financieros están asociados con efectos climáticos severos en los movimientos de los barcos que causan interrupciones o retrasos en la operación, e incluso pérdidas de tierra y capital en circunstancias extremas. Como resultado, los puertos se han convertido en actores más activos en la mitigación del cambio climático.

## 5.3. Conclusiones del Capítulo 5.

- *Algunas empresas han participado de forma proactiva en el desarrollo de tecnologías innovadoras para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. Empresas noruegas como, DNV GL, SINTEF Ocean y las autoridades marítimas noruegas, el conglomerado suizo-sueco ABB, y la compañía Wärtsila de Finlandia, son pioneras en el desarrollo de tecnologías de propulsión híbridas y complementarias para la transformación del sector marítimo hacia la descarbonización.*
- *Las soluciones tecnológicas de propulsión tienen como ventaja el aumento de la eficiencia operativa, que a su vez tiene un efecto beneficioso directo sobre el consumo de combustible y las emisiones de escape. Son aplicables tanto a buques de nueva construcción como en el reacondicionamiento de los ya existentes, obteniéndose valores de reducción y ahorro energéticos significativos.*
- *Algunas soluciones tecnológicas aplicadas conjuntamente en forma de paquetes en un mismo buque tienen un efecto todavía mayor en el ahorro energético, al mismo tiempo que el rendimiento de la embarcación mejora notablemente promueve una mayor seguridad debido a un mayor nivel de redundancia en comparación con el funcionamiento de las soluciones convencionales.*
- *Las soluciones de propulsión híbridas eléctricas ya existentes en el mercado son una alternativa inmediata para descarbonizar el transporte marítimo, que aportan múltiples beneficios en el funcionamiento de los sistemas de propulsión y garantizan emisiones cero dentro y fuera del puerto, así como en las operaciones de carga y descarga.*
- *Existe una prima de riesgo para aplicar tecnologías innovadoras, para gestionar los riesgos asociados a la evolución de las reglamentaciones climáticas debe tenerse en cuenta una importante demanda prevista de capital para la modificación de buques.*
- *Los barcos propulsados por combustibles fósiles tienen el riesgo de convertirse en activos varados una vez que se aplique una regulación más estricta relacionada con el clima.*
- *Los activos fijos y la infraestructura, especialmente en los puertos y en las ciudades portuarias, son particularmente vulnerables al aumento del nivel del mar y a las condiciones climáticas extremas, como tormentas y olas altas; en los puertos, los riesgos financieros están asociados con efectos climáticos severos en los movimientos de los barcos que causan interrupciones o retrasos en las operaciones, e incluso pérdidas de tierra y capital en circunstancias extremas. Como resultado, los puertos se han convertido en actores más activos en la mitigación del cambio climático.*
- *Para descarbonizar realmente la navegación marítima, la reducción de las emisiones debería establecerse a lo largo de todo el ciclo de vida del consumo de energía. Cuando se utiliza electricidad producida a partir de fuentes de energía totalmente renovables, las emisiones de carbono durante todo el ciclo de vida son iguales a cero.*

---

# Conclusiones generales.

- Las emisiones de carbono generadas por las actividades humanas han sido la causa principal del calentamiento global y la contaminación atmosférica.
- Para limitar el calentamiento global las emisiones deben reducirse a la mitad para el año 2030 para alcanzar la disminución de 1,5°C
- El transporte marítimo contribuye con el 3% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Dentro de la flota marítima internacional, los buques graneleros, los petroleros y los portacontenedores emitieron 440, 210 y 140 millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera respectivamente, y representan el mayor tonelaje mundial.
- A la hora de evaluar la actividad compleja de un buque durante un viaje para determinar las emisiones totales hay que tener en cuenta varios factores que dependen del tráfico total y las características de la flota.
- Para reducir las emisiones de efecto invernadero procedentes del transporte marítimo El MEPC de la OMI ha estado elaborando una Estrategia Inicial que definen los niveles de ambición para reducir las emisiones y los principios rectores en, al menos un 40% para el año 2030 y proseguir los esfuerzos hasta el año 2050 , en correspondencia con el acuerdo de París que tiene como objetivo mantener el aumento de la temperatura por debajo de los 2°C hasta limitar el aumento a 1,5°C.
- Como programa de seguimiento de la Estrategia Inicial el MEPC incluye una lista de posible medidas adicionales a corto, medio y largo plazo, teniendo en cuenta las repercusiones para los Estados.
- En el Anexo VI del Convenio MARPOL se establecen los límites de emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>, COV y PM y se establecen las medidas técnicas y operacionales de eficiencia energética de carácter obligatorio, así como las normas más estrictas en relación con las emisiones para las zonas de control designadas.
- El EEDI para los buques de nueva construcción y el EEXI para los buques existentes son las medidas técnicas más importantes aplicadas a los buques de más de 400 GT, y miden la eficiencia energética de los buques.
- El SEEMP aplicado a los buques de más de 400 GT y el indicador de la intensidad de carbono CII para los buques de igual o mayor a 5000 GT, son las medidas operativas más importantes para reducir las emisiones y mejorar la eficacia de los buques.
- Las acciones más significativas que contribuyen al consumo eficiente de combustible y a la disminución de las emisiones pueden ser mediante el uso de combustibles y energías alternativas, acciones del tipo operacionales como por ejemplo la reducción de la

velocidad, y acciones del tipo tecnológicas, como los dispositivos de mejora de la propulsión, entre otras.

- No todas las opciones tecnológicas planteadas han alcanzado la total madurez en el mercado, ni todas se pueden aplicar como retroadaptación, los potenciales de reducción del consumo energético varían según el tipo de buque y las condiciones meteorológicas y las operaciones que se realizan. Para los combustibles, las proyecciones de los costos presentan mayores incertidumbres que el resto de los elementos de costo.
- Algunas empresas pioneras en el desarrollo de tecnologías innovadoras para reducir las emisiones han lanzado propuestas de soluciones tecnológicas de propulsión híbridas eléctricas que aumentan la eficiencia operativa del buque, y a su vez tienen un efecto directo y positivo sobre el consumo de combustible y las emisiones de escape.
- Para descarbonizar realmente el transporte marítimo y reducir las emisiones, la energía empleada debe ser producida a partir de fuentes totalmente renovables.

---

# Bibliografía y referencias

- [1] Allen, MR, O.P. Dube, W. et.al, 2018: Calentamiento Global de 1.5°C. Un informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C por encima de los niveles preindustriales y las vías de emisión de gases de efecto invernadero relacionadas, en el contexto del fortalecimiento de la respuesta global a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos para erradicar la pobreza [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)]. En prensa. [Consultado en 31-01-2022]. Disponible en: <<<https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-1/>>>
- [2] IPCC, 2014a: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1–32.
- [3] Folland, C.K., O. Boucher, A. Colman, and D.E. Parker, 2018: Causes of irregularities in trends of global mean surface temperature since the late 19th century. *Science Advances*, 4(6), eaao5297, doi:10.1126/sciadv.aao5297.
- [4] Myhre, G. et al., 2013: Anthropogenic and natural radiative forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 658–740.
- [5] DNV. Financing The Energy Transition. 2021. [Consultado: 01-02-2022] Disponible en: <<https://www.dnv.com/energy/campaign/financing-the-energy-transition.html>>
- [6] Englert, Dominik; Losos, Andrew; Raucci, Carlo; Smith, Tristan. 2021. Volume 1: The Potential of Zero-Carbon Bunker Fuels in Developing Countries. World Bank, Washington, DC. © World Bank. Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35435> License: CC BY 3.0 IGO.
- [7] IMO, 23 marzo 2021. Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020. [Consultado en: 05-03-22]. Disponible en: <<<https://www.imo.org/es/MediaCentre/Pages/WhatsNew-1596.aspx>>>
- [8] Ian Tiseo, 27 enero 2021. Emisiones de CO2 en el transporte marítimo internacional 2020. [Consultado en: 05-03-22]. Disponible en <<https://www.statista.com/statistics/216048/worldwide-co2-emissions-by-ship-type/#statisticContainer>>
- [9] Csiro. Australia's National Science Agency. [En línea]. [Consultado en: 05-12-21]. Disponible en: <<<https://www.csiro.au/en/research/natural-environment/atmosphere/Latest-greenhouse-gas-data>>>

- [10] Paul Campling and Liliane Janssen, et al. Specific evaluation of emissions from shipping including assessment for the establishment of possible new emission control areas in European Seas. Belguim, march 2013. Disponible en: <<[www.vito.be](http://www.vito.be)>>
- [11] Europea Commission. Brussels, 19-5-2020. 2019 Annual Report on CO<sub>2</sub> Emissions from Maritime Transport. [Consulta: 10 Febrero 2022 ] Disponible en <<[https://ec.europa.eu/clima/news-your-voice/news/commission-publishes-first-annual-eu-report-co2-emissions-maritime-transport-2020-05-25\\_en](https://ec.europa.eu/clima/news-your-voice/news/commission-publishes-first-annual-eu-report-co2-emissions-maritime-transport-2020-05-25_en)>>
- [12] Europea Commission. Brussels, 2021. 2020 Annual Report on CO<sub>2</sub> Emissions from Maritime Transport. [Consulta: 12 Febrero 2022 ]
- [13] Naciones Unidas, Acción por el clima. Acuerdo de París.[En línea]. [Consultado en: 18 febrero 2022] Disponible en: <<<https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>>>
- [14] United Nations, Climate Change. The París Agreement. [En línea]. [Consultado en: 18 febrero 2022] Disponible en: <<<https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>>>
- [15] Organización Marítima Internacional. MARPOL, edición refundida del 2017. OMI, Sexta edición: 2017. ISBN: 978-92-801-3141-3. Disponible en: <<[www.imo.org](http://www.imo.org)>>
- [16] OMI: Resolución MEPC.304(72) Anexo 11, (adoptada el 13 de Abril de 2018) Estrategia inicial de la OMI sobre la reducción de las emisiones de GEI procedentes de los buques. [Consultado en: 20 de Febrero 2022]. pp-10.
- [17] Luis Figaredo y Armando Pérez, Informe: Los Principios de Poseidón. Marítimo, 12 de julio de 2019. [En línea]. [Consultado en: 11 de noviembre de 2021]. Disponible en: <<<https://www.transportexxi.com/informe-los-principios-de-poseidon/>>>
- [18] OMI: Reducción de gases de efecto invernadero procedente de los buques. [en línea]. [Consultado en: Febrero 2022]. Disponible en: <<[imo.org](http://imo.org)>>
- [19] OMI: MEPC.1/Circ.866, adoptada el 30 enero 2017. Directrices de 2014 sobre el método de cálculo del Índice de Eficiencia Energética de Proyecto (EEDI) obtenido para buques nuevos, Enmendadas (Resolución MEPC.245(66), Enmendada por la Resolución MEPC.263(68), MEPC.281(70) y Resolución MEPC.308(73)) [Consultado en: 20 de Febrero 2022]. Disponible en: <<[imo.org](http://imo.org)>>
- [20] OMI: MEPC 76/15/Add.2, 12 de julio 2021. Informe del Comité de Protección del Medio Marino correspondiente a su 76º periodo de sesiones (MEPC 76/15). Original en inglés [Consultado en: 20 de Febrero 2022]. Disponible en: <<[imo.org](http://imo.org)>>
- [21] OMI: MEPC.1/Circ.683, 17 de agosto 2009. Orientaciones para la elaboración de un Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del buque (SEEMP). [Consultado en: 20 de Febrero 2022]. Disponible en: <<[imo.org](http://imo.org)>>
- [22] Englert, Dominik; Losos, Andrew; Raucci, Carlo; Smith, Tristan. 2021. Volume 1: The Potential of Zero-Carbon Bunker Fuels in Developing Countries. [Online]. World Bank, Washington, DC.



---

© World Bank. [Consultado en: 15 de noviembre de 2021] [Disponible en: <<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35435>> License: CC BY 3.0 IGO.

- [23]REVISTA SUSTAINABILITY 2020, 22 Octubre. Article: Decarbonizing Maritime Transport: The Importance of Engine Technology and Regulations for LNG to Serve as a Transition Fuel. [En línea] 2020. Elizabeth Lindstad, et al. [Consultado en: 10 de enero del 2021] Disponible en: <<[https://www.mdpi.com/2071-1050/12/21/8793/htm#table\\_body\\_display\\_sustainability-12-08793-t003](https://www.mdpi.com/2071-1050/12/21/8793/htm#table_body_display_sustainability-12-08793-t003)>>
- [24]International Transport Forum. Navigating Towards Cleaner Maritime Shipping: Lessons from the Nordic Region. ITF/2020 [Online] Decarbonizing Transport. [Consulted at: Enero 2021] Available in: <<https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/navigating-cleaner-maritime-shipping.pdf>>
- [25]José R. Ares, et al. El hidrógeno como vector energético: mucho hecho pero casi todo por hacer. E.M. Nº 62, Mayo-Agosto 2019. [En Línea]. Revista 62. [Consultado en 20 de febrero 2022], Disponible en: << [http://www.encuentros-multidisciplinares.org/revista-62/jose-ares\\_y\\_otros.pdf](http://www.encuentros-multidisciplinares.org/revista-62/jose-ares_y_otros.pdf)>>
- [26]IMO. Norway GreenVoyage2050 Project, E4tech and Houlder , 2021. Alternative fuels and energy carriers for shipping Workshop. [Consulted at February 2022] Available in: <<[imo.org](https://imo.org)>>
- [27]IMO. MEPC 77/INF.2, 12 August 2021 Reduction of GHG emissions from ships. Study on decarbonization of the Belgian maritime sector for small vessels (<5000 GT). Submitted Belgium. [Consulted at February 2022] Available in: << [imo.org](https://imo.org)>>
- [28]IMO. MEPC 72/7/10, 16 de febrero 2018. Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los buques. [Consultado en: Febrero 2022]. Disponible en: << [imo.org](https://imo.org)>>
- [29]IMO. MEPC.1/Circ.896, 14 diciembre 2021. Orientaciones de 2021 para el tratamiento de las tecnologías innovadoras de eficiencia energética en el cálculo y la verificación del EEDI y el EEXI obtenidos. [Consultado en: 10 de marzo 2022]. Disponible en: << [imo.org](https://imo.org)>>
- [30]IMO. MEPC 68/INF.38, 6 march 2015. Air pollution and energy efficiency. The EEDI database figures and information of energy saving technologies updated by participants of the Correspondence Group on EEDI review required under regulation 21.6 of MARPOL Annex VI. Submitted by Japan. Annex 2. [Consulted at March 10, 2022] Available in: << [imo.org](https://imo.org)>>
- [31]IMO. MEPC 72/INF.12, 1 February 2018. Air pollution and energy efficiency. [Consultado en: 10 de marzo 2022]. Disponible en: << [imo.org](https://imo.org)>>
- [32]P. Ghadimi, S.M. Sajedi, and S. Tavakoli. Experimental study of the wedge effects on the performance of a hard-chine planing craft in calm water. [Online] Scientia Iranica B (2019) 26(3), 1316-1334 [Consulted at: March 11, 2022]. Available in: <[http://scientiairanica.sharif.edu/article\\_20607.html](http://scientiairanica.sharif.edu/article_20607.html)>
- [33]KAPPEL Propeller - DTU Mechanical Engineering, 2017 [Online]. [Consulted at December 2021]. Available in: <[https://www.mek.dtu.dk/english/Research/Feature\\_Articles/KAPPEL\\_Propeller](https://www.mek.dtu.dk/english/Research/Feature_Articles/KAPPEL_Propeller)>

- [34]Giulio Gennaro, Juan Gonzalez- Adalid. Improving the Propulsion Efficiency by means of Contracted and Loaded Tip (CLT®) Propellers. [Online] February 2016. [Consulted at December 2021]. Available in: <https://www.semanticscholar.org/paper/Improving-the-Propulsion-Efficiency-by-means-of-and-Gennaro-Gonz%C3%A1lez-Adalid/6f2fb260c4eb2d01bbf43ef533028917a25204d7>>
- [35]J.S. Carlton FEng. Science Direct. Contra-Rotating Propeller: Practical Ship Hydrodynamics in Marine Propellers and Propulsion (Third Edition), 2012. [Online] [Consulted at December 2021] Available in: << <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/contra-rotating-propeller>>>
- [36]Beyond Discovery. The Grim vane wheel. [online] 30 March 2022. [Consulted at 15 march 2022] Available in: <https://www.beyonddiscovery.org/cargo-ships/the-grim-vane-wheel.html>
- [37]HANSA International Maritime Journal – 152. Jahrgang – 2015 – Nr. 9. Schiffahrts-Verlag Hansa. Bibliothek Hamburg. [Consulted at 16 march 2022]
- [38]J.S. Carlton FEng. Ducted Propeller. Propulsion Systems in Marine Propellers and Propulsion. [online]. ScienceDirect (Third Edition), 2012. [Consulted at 16 march 2022]. Available in: <<https://www.sciencedirect.com/book/9780081003664/marine-propellers-and-propulsion>>
- [39]Gert-Jan Zondervan, et al. On the Design and Analysis of Pre-Swirl Stators for Single and Twin Screw Ships [Online]. Second International Symposium on Marine Propulsors smp'11, Hamburg, Germany, June 2011. [Consulted at 16 march 2022]. Available in: <[http://www.marinepropulsors.com/smp/files/downloads/smp11/Paper/TA2-2\\_Zondervan.pdf](http://www.marinepropulsors.com/smp/files/downloads/smp11/Paper/TA2-2_Zondervan.pdf)>
- [40]Pre-Swirl Duct of Fuel Oil Saving Device Design and Analysis for Ship. [Online] 선박용 연료절감장치 Pre-Swirl Duct 의 설계 및 평가방법 연구. June 2013. [Consulted at 16 march 2022]. Available in: <<https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO201319850772531.pdf>>
- [41]Japan Marine United Corporation. Technology Development. [Online] Engineering/Research & Development. [Consulted at 16 march 2022]. Available in: <<https://www.jmuc.co.jp/en/rd/development/hydrodynamics/energy-saving/>>
- [42]Wärtsilä. GATE RUDDER™ - Reduce fuel consumption and improve thrust performance and manoeuvrability [Online] Gate Rudder. 2022 Wärtsilä. [Consulted at 17 march 2022]. Available in: < <https://www.wartsila.com/marine/products/propulsors-and-gears/energy-saving-technology/gate-rudder-tm>>
- [43]Kamome Propeller. Gate Rudder System. A new Energy Saving System, confirming 14% Energy Saving on actual ship. [Online] Kamome Propeller Co., Ltd. [Consulted at 17 march 2022]. Available in: <<https://www.kamome-propeller.co.jp/en/products/gaterudder/>>
- [44]BEH<sub>2</sub>YDRO. Technologie BEH<sub>2</sub>YDRO hidrogen combustion engines. [Online]. [Consulted at 18 march 2022]. Available in: <<<https://www.behydro.be/en/home.html>>>
- [45]IMO. MEPC 65/INF.15. Air Pollution and Energy Efficiency. Marpol Annex VI Tier III and its impact on the superyacht sector. 20 marzo 2013. [Consultado en: 17 de marzo 2022]. Disponible en: << [imo.org](http://imo.org)>>
- [46]Luxatic. Feadship Launches Savannah, the World's First Hibrid Superyacht. [Online] 2022 Luxatic. [Consulted at 18 march 2022]. Available in:

- 
- <<<https://www.superyachts.com/news/story/feadship-launches-savannah-the-first-hybrid-superyacht-3647/>>>
- [47]MOL. Mitsui O.S.K. Lines. Vessel installed with Waste Heat Energy Recovery System Delivered- More than 5% reduction in fuel consumption with vessel in service confirmed. [Online]. 02 Julio 2014. TOKYO-Mitsui O.S.K. Lines, Ltd. [Consulted at 19 march 2022]. Available in: <<<https://www.mol.co.jp/en/pr/2014/14035.html>>>
- [48]AKCP. Variable Frequency Drives to Reduce Energy Consumption. [Online]. Diciembre 2021 AKCP Est. USA 1981. [Consulted at 19 march 2022]. Available in: <<<https://www.akcp.com/blog/using-variable-frequency-drives-vfd-to-reduce-energy-consumption/>>>
- [49]MAN. Waste Heat Recovery System (WHRS) for reduction of fuel consumption, Emissions and EEDI.[Online] MAN Diesel & Turbo. [Consulted at 19 march 2022]. Available in:<<<https://mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/technical-papers/waste-heat-recovery-system.pdf>>>
- [50]Nauticexpo.Reducción catalítica selectiva para buques. [Online] [ Consultado en: 19 marzo 2022] Disponible en: <<<https://www.nauticexpo.es/prod/panasia-co-ltd/product-36631-67957.html>>>
- [51]Wärtsilä. Air Lubrication System cuts fuel consumption and emissions by up to 10 % [Online] Air Lubrication System. 2022 Wärtsilä. [Consulted at 20 march 2022]. Available in: <<<https://www.wartsila.com/marine/products/propulsors-and-gears/energy-saving-technology/air-lubrication-system>>>
- [52]Ruihua Lu & Jonas W. Ringsberg (2020) Ship energy performance study of three wind-assisted ship propulsion technologies including a parametric study of the Flettner rotor technology, Ships and Offshore Structures, 15:3, 249-258, DOI: 10.1080/17445302.2019.1612544 [Online] [Consulted at 20 march 2022]. Available in: <<<https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1612544>>>
- [53]Eco Marine Power. Aquarius Eco Ship. Zero emission ship design concept with rigid sails & solar power pathway to zero emission shipping. [Online] 2011-2021 Eco Marine Power Co. Ltd. [Consulted at 20 march 2022]. Available in: <<<https://www.ecomarinepower.com/en/aquarius-eco-ship>>>
- [54]Van Oossanen Naval Architects. Innovation: Hull Vane [Online] 2020 [Consulted at 20 march 2022]. Available in: <<<https://oossanen.nl/innovation/#hv>>>
- [55]Lindstad, H.E., Eskeland, G.S. and Riialand, A., 2017. Batteries in offshore support vessels– Pollution, climate impact and economics. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 50, pp.409-417;\_Peralta P, C.O., Vieira, G.T., Meunier, S., Vale, R.J., Salles, M.B. and Carmo, B.S., 2019. Evaluation of the CO2 emissions reduction potential of li-ion batteries in ship power systems. Energies, 12(3), p.375.
- [56]Gareth Horton, et al. Technological, Operational and Energy Pathways for Maritime Transport to Reduce Emissions Towards 2050. 31 January 2022. [Online] Ricardo, Energy & Enviroment. Ref: ED 13389. Final Report. Issue number 6. [Consulted at April 2022]. Available in:

<<https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/Technological-Operational-and-Energy-Pathways-for-Maritime-Transport-to-Reduce-Emissions-Towards-2050.pdf>>

[57]El canal marítimo y logístico, 6 agosto 2020. [Consultado en: 15 diciembre 2021]. Disponible en: << <https://www.diarioelcanal.com/un-estudio-de-la-omi-alerta-que-las-emisiones-de-los-buques-pueden-aumentar-un-50-hasta-el-2050/>>>

[58]MEPC 77/7/19 Potencial de los combustibles líquidos sin emisiones de carbono en los países en desarrollo y función del gas natural licuado (GNL) en la transición hacia un transporte marítimo con emisiones de carbono bajas o nulas. [Consultado en: 15 noviembre 2021]. Disponible en <[https://imocloud.sharepoint.com/MS/SWPU/MEPC/77/MEPC 77-7-19.docx](https://imocloud.sharepoint.com/MS/SWPU/MEPC/77/MEPC%2077-7-19.docx)>

[59]DNV GL, Wärtsilä . Decarbonising shipping., is it only about alternative fuels? Webinar. November 3, 2020.

[60]Wärtsilä . Smart electrical and power systems. Charging towards decarbonisation. Webinar June 17, 2021.