

Exterior: Revista de Investigación de ADEN University
ISSN L 2953-3090
Vol. 4 (1) enero/junio 2025

Descarbonización en el transporte marítimo

Decarbonisation in maritime transport

Jehan Carlos Guillen-Miranda
Universidad Euroamericana, Panamá
jehanguillen@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0009-5813-8225>

Recibido: 05/11/2024.

Aceptado: 26/12/2024.

Publicado: 02/01/2025.

Cómo citar: Guillen-Miranda, J. (2025). Descarbonización en el transporte marítimo. *Exterior*, 4(1), 65-78. <https://doi.org/10.56880/exterior41.5>

Resumen

El transporte marítimo es la vía principal para el comercio global, pero genera un 3% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono, estableciendo la necesidad de disminuir esta cifra para cumplir con los objetivos de sostenibilidad ambiental y combatir el cambio climático. El estudio busca analizar las estrategias para la descarbonización del transporte marítimo y su impacto en la sostenibilidad ambiental, los costos operativos y el cumplimiento de las regulaciones internacionales. Se utilizó un enfoque cualitativo, descriptivo y transversal, aplicando la técnica de saturación de información para extraer 32 referencias. Las estrategias se centraron en mejorar la eficiencia energética, el uso de combustibles alternativos y la implementación de tecnologías de reducción de emisiones, destacando el diseño de buques, los sistemas de propulsión, y la mejora de rutas y planificación de la navegación. Del estudio se desprende que se necesitan altos niveles de inversión para el desarrollo y adopción de tecnologías libres de carbono. Las regulaciones internacionales, aunque necesarias, deben ser equilibradas para no afectar negativamente la competitividad del sector, ya que la descarbonización total requiere de un esfuerzo global, innovación continua y políticas públicas que mejoren la transición hacia la navegación marítima sostenible.

Palabras clave: comercio internacional, contaminación del agua, desarrollo económico, efectos de las actividades humanas, transporte marítimo.

Abstract

Maritime transport is the main route for global trade, but it generates 3% of global carbon dioxide emissions, establishing the need to reduce this figure in order to meet environmental sustainability goals and combat climate change. The study seeks to analyze strategies for the decarbonization of maritime transport and its impact on environmental sustainability, operating costs and compliance with international regulations. A qualitative, descriptive and cross-sectional approach was used applying the information saturation technique to extract 32 references. The strategies focused on improving energy efficiency, the use of alternative fuels and the implementation of emission reduction technologies, highlighting ship design, propulsion systems and the improvement of routes and navigation planning. The study shows that high levels of investment are needed for the development and adoption of carbon-free technologies. International regulations, although necessary, must be balanced so as not to negatively

affect the competitiveness of the sector, since full decarbonization requires a global effort, continuous innovation and public policies that improve the transition towards sustainable maritime navigation.

Keywords: international trade, water pollution, economic development, effects of human activities, maritime transport.

Introducción

El transporte marítimo, que constituye la principal vía del comercio mundial, está compuesto de redes de navegación que facilitan y fortalecen la interconexión, al contar con dos puntos estratégicos como el Canal de Suez y el Canal de Panamá, que sirven de atajo en los largos trayectos intercontinentales, reduciendo tiempos y costos (UNCTAD, 2024). Calificado como el alma del comercio mundial (OMC, 2024) desde el año 2015 representaba aproximadamente el 90% del movimiento de bienes, con una expansión constante traducida en el bajo costo de los fletes (Balcombe *et al.*, 2019). Su flota registrada opera con más de un millón de marineros en más de 150 países y más de 50.000 buques mercantes que transportan cargas de todo tipo (OMI, 2015a).

Sin embargo, este sector también es una fuente representativa de emisiones de gases de efecto invernadero, generando alrededor del 3% de las emisiones mundiales anuales de dióxido de carbono de origen antropogénico (OMI, 2023). Las emisiones de más de “100.000 barcos que consumen alrededor de 300 toneladas de combustible” (Danish Maritime Authority, 2022, párr. 9), junto con otros contaminantes atmosféricos derivados del uso de combustibles fósiles, han impulsado acuerdos de sostenibilidad ambiental, llevando a la industria hacia la transición energética, para que se integren las estrategias de descarbonización (IMO, 2024).

La *International Maritime Organization* (Organización Marítima Internacional) estableció en el año 2018 el objetivo de rebajar al menos en un 50% las emisiones de GEI para el año 2050, en comparación a la cantidad que producía para ese período (RESOLUTION MEPC.304[72], 2018). Este compromiso motivó el desarrollo e implementación de estrategias diversas relacionadas con el uso de combustibles alternativos como el gas natural licuado, el hidrógeno y el amoníaco; con el uso de sistemas de propulsión con velas o sistemas híbridos, y con sistemas automatizados para mejorar las rutas y la eficiencia operativa.

Estas medidas consideran que los combustibles basados en el hidrógeno son candidatos firmes para lograr la descarbonización, y se consideran los principales candidatos para alcanzar esta meta que, “en promedio, pueden representar el 14 % de la combinación total de combustibles para 2030 y alcanzar el 66 % para 2050” (Raucci *et al.*, 2023, p. 14). Este progreso ha sido desigual por causa de los altos costos iniciales, la falta de infraestructura global y las incertidumbres regulatorias (Lindstad *et al.*, 2021).

Desde el 1 de enero del 2018 los buques de más de 5.000 toneladas brutas que operan en puertos del Espacio Económico Europeo, también debieron cumplir con el Reglamento MVR marítimo, que exige el monitoreo, notificación y verificación de las emisiones de CO₂ y, a partir del 1 de enero de 2024, también del óxido nitroso y metano, además de otras informaciones relevantes (Comisión Europea, 2024). Aunque existen avances, también persisten interrogantes como la planteada en este estudio para determinar ¿cuáles son las estrategias actuales más efectivas para la descarbonización del transporte marítimo? y

¿cómo impactan estas estrategias en la sostenibilidad ambiental, los costos operativos y el cumplimiento de las regulaciones internacionales? Estas son las preguntas que establecen el análisis, considerando las oportunidades y barreras que impulsan esa transición energética.

El artículo tiene como objetivo analizar las estrategias actuales para la descarbonización en el transporte marítimo, evaluando su impacto en la sostenibilidad ambiental, los costos operativos y el cumplimiento de las regulaciones internacionales. La pertinencia del tema introduce la unión de las operaciones de este tipo de transporte con los compromisos climáticos globales, destacando la relevancia del sector en la lucha contra el cambio climático y el desarrollo sostenible, dado que “si el sector marítimo fuera un país, se posicionaría como el sexto mayor emisor mundial” (Calatayud & Rivas Amiassorho, 2024, párr. 3).

Revisión de la literatura

En términos del estado del arte, se han tratado aspectos técnicos y económicos de la descarbonización, como las presentadas por Bouman *et al.* (2017), quienes estudiaron el potencial de la reducción de emisiones mediante tecnologías emergentes y combustibles alternativos, así como medidas de mitigación que incluyen el diseño del casco (forma y peso, para aumentar el rendimiento hidrodinámico y minimizar la resistencia), la economía de escala (los barcos y las cargas más grandes son más eficientes energéticamente por unidad de flete), la potencia y propulsión (soluciones de potencia híbrida, y dispositivos para ahorrar energía como las velas), o las rutas y programación meteorológica (encontrar rutas y velocidades de navegación, considerando las condiciones de la corriente, las olas, el clima, y realizar entregas según los acuerdos contractuales para minimizar el consumo de combustible).

Por su parte, Traut *et al.* (2014) examinaron las implicaciones económicas de las regulaciones climáticas en la industria, determinando por un lado que, aunque los costos iniciales de cumplimiento eran elevados, el efecto combinado de las regulaciones podría generar beneficios a largo plazo, siempre que se garantizara una implementación estricta y una cooperación a nivel mundial. Sin embargo, también exponían que una de las restricciones del debate actual era la falta de representación de las compañías navieras más pequeñas y las que se encontraban en los países en desarrollo, porque esas opiniones podrían llegar a contrastar con las de aquellas que tenían mayor capacidad económica y las que se encontraban en países desarrollados.

Al-Enazi *et al.* (2021) estudiaron la posibilidad de reducir el impacto ambiental del transporte marítimo mediante el análisis de combustibles alternativos más limpios como el gas natural licuado, el hidrógeno y el amoníaco, para su uso en buques. Esta investigación evalúa las emisiones de dióxido de carbono y otros contaminantes generados a lo largo de la cadena de valor de los combustibles convencionales, destacando su huella en el clima y la salud humana.

Los autores analizaron las regulaciones de la OMI que limitan las emisiones de azufre y las posibles soluciones tecnológicas para cumplir con esas normativas (uso de combustibles de bajo contenido de azufre, gasóleo marino, depuradores o la transición hacia combustibles como el GNL, el hidrógeno y el amoníaco). Destacaron las ventajas y barreras al respecto, la compatibilidad del

amoníaco como medio de almacenamiento de hidrógeno, su uso en motores y turbinas (por las altas emisiones de gases de efecto invernadero), y la dinámica del mercado de GNL como combustible de transición hacia una economía basada en hidrógeno, haciendo un llamado a la adopción temprana de estos combustibles por parte de las compañías navieras y los operadores portuarios, con los consecuentes beneficios económicos y estratégicos de la transición hacia otros combustibles más limpios en el sector marítimo.

Foretich *et al.* (2021) también señalan que el desarrollo de los combustibles marinos de la próxima generación está siendo impulsado por una combinación de regulaciones internacionales, como las de la Organización Marítima Internacional y las fuerzas del mercado, porque deben ser escalables, homogéneos y cumplir con los estándares de seguridad y sostenibilidad ambiental. Coinciden en que la adopción masiva de combustibles alternativos dependerá de una logística eficiente, de precios competitivos y la colaboración de fabricantes, reguladores y operadores, porque si se superan estos escollos, los biocombustibles y otros combustibles flexibles pueden convertirse en soluciones viables a corto y largo plazo.

Metodología

La metodología del estudio se orientó a analizar las estrategias planteadas en la descarbonización, evaluando su impacto en la sostenibilidad ambiental, los costos operativos y el cumplimiento de las regulaciones internacionales. Para alcanzar este objetivo se adoptó un enfoque cualitativo, descriptivo y transversal, que permitió sintetizar y evaluar la información proveniente de fuentes documentales relevantes, con artículos académicos, informes institucionales y datos técnicos sobre las políticas y tecnologías relacionadas con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector marítimo, particularmente con respecto a los objetivos y directrices establecidos por la Organización Marítima Internacional.

Para el análisis se seleccionaron criterios de relevancia, actualidad y autoridad, utilizando bases de datos académicas como Science Direct, MDPI, Wiley, y Taylor & Francis, así como documentos oficiales de la OMI, para ampliar la visión acerca de los avances en tecnologías de descarbonización, regulaciones vigentes y proyecciones futuras de emisiones en el sector. Los informes institucionales y académicos expusieron el panorama sobre las políticas de descarbonización propuestas, las tecnologías emergentes y las experiencias de implementación de soluciones sostenibles.

En términos de análisis se empleó la técnica de saturación de información; inicialmente se consultaron 57 fuentes relacionadas con el tema de investigación, separadas en 13 subtemas desde el año 2013 hasta el 2024 para cumplir con la vigencia de los datos. Durante el desarrollo del estudio se identificaron 32 referencias relevantes y complementarias, de las cuales se utilizaron 17 para abordar el objetivo. En la Tabla 1 se muestra la clasificación de las fuentes:

Tabla 1
Fuentes utilizadas

Subtema	Fuente	Año
Aspiraciones y futuro del transporte marítimo	Calatayud & Rivas Amiassorho	2024
	Raucci <i>et al.</i>	2023
	Balcombe <i>et al.</i>	2019
Colaboraciones y asociaciones para la descarbonización	Danish Maritime Authority	2022
Combustibles alternativos (hidrógeno verde, amoníaco, etc.)	Atilhan <i>et al.</i>	2021
	Chavando <i>et al.</i>	2024
	Elrhoul <i>et al.</i>	2023
	Ampah <i>et al.</i>	2021
Consecuencias del transporte marítimo en el cambio climático	Gilbert <i>et al.</i>	2014
Desafíos y oportunidades en la descarbonización	OMC	2024
	UNCTAD	2024
Descarbonización del transporte marítimo	Al-Enazi <i>et al.</i>	2021
	Bouman <i>et al.</i>	2017
	IMO	2024
Evaluación de combustibles en el sector marítimo	Traut <i>et al.</i>	2014
Innovaciones tecnológicas en el transporte marítimo	Lindstad <i>et al.</i>	2021
	Malloupas & Yfantis	2021
	Tezdogan <i>et al.</i>	2016
Investigación y desarrollo en combustibles marinos	Bigi <i>et al.</i>	2020
	Shi	2016
Políticas y medidas para la descarbonización	Psaraftis	2016
	Wan	2018
	RESOLUTION MEPC.304[72]	2018
Reducción de emisiones en el sector marítimo	Lindstad	2013
	Foretich <i>et al.</i>	2021
Regulaciones y estrategias internacionales	Comisión Europea	2024
	OMI	2015a
	OMI	2015b
	OMI	2023

Sistemas de propulsión eléctrica y tecnologías innovadoras	Nguyen <i>et al.</i>	2020
	Wang <i>et al.</i>	2017
	Szlapczynska & Smierzchalski	2007

Desde la literatura, se realizó una contrastación entre los estudios que se centran en mejorar la eficiencia energética de los buques existentes (Bouman *et al.*, 2017; Lindstad, 2013; Gilbert *et al.*, 2014) y los autores que estudiaron la viabilidad de combustibles como el GNL, hidrógeno, amoníaco y metanol (Al-Enazi *et al.*, 2021; Atilhan *et al.*, 2021; Chavando *et al.*, 2024; Elrhoul *et al.*, 2023).

En la delimitación, el alcance temático de las estrategias se asume desde las tecnologías, políticas y prácticas existentes o en desarrollo, que buscan reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector, sin abordar otros aspectos de la sostenibilidad ambiental, como la contaminación del agua o la gestión de residuos. Geográficamente, considera el transporte marítimo a nivel global, asentándose en las regulaciones internacionales de la Organización Marítima Internacional, y cronológicamente comprende el período establecido entre 2013 y 2024.

Resultados

En el transporte marítimo, la descarbonización es el proceso de disminuir o eliminar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero (GEI) derivados de las actividades de navegación, adoptando tecnologías limpias como el uso de combustibles alternativos y la mejora de la eficiencia energética de los barcos, con el objetivo de cumplir los compromisos impuestos por las normativas internacionales de sostenibilidad y mitigar el impacto ambiental.

A nivel mundial, un solo barco que utiliza combustible con un contenido de azufre del 3.5%, emite la misma cantidad que 210.000 camiones. En el año 2018 el sector produjo más de un millón de toneladas de gases de efecto invernadero y dióxido de carbono, con un aumento del 9.6% y 9.3% respectivamente, en comparación con el año 2012; como resultado, representa el 2.89% de las emisiones antropogénicas globales. La mayoría de estas emisiones provienen de buques que navegan a menos de 400 km de la costa, constituyendo una amenaza al medio ambiente y la salud, debido a los GEI, los óxidos de azufre (SO_x), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y las partículas finas (Ampah *et al.*, 2021).

Estos autores, así como Bouman *et al.* (2017) y Balbombe *et al.* (2019), señalan que las estrategias para la descarbonización se centran principalmente en el aumento de la eficiencia energética, el uso de los combustibles alternativos y la implementación de tecnologías que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero.

Diseño de buques

En el año 2011 se introdujo el Índice de Diseño de Eficiencia Energética (MARPOL EEDI) que entró en vigencia el 1 de enero de 2013 (OMI, 2015b), de manera obligatoria para los buques de nueva construcción -para fomentar las

innovaciones tecnológicas y de ingeniería-, destinado a ampliar el rendimiento energético (Wan, 2018).

En primer lugar, esta eficiencia en las mejoras del diseño de los buques han demostrado aumentar el rendimiento hidrodinámico, la adición de recubrimientos especiales para disminuir la fricción y la implementación de soluciones de propulsión híbrida. El uso de velas, combinadas con sistemas de energía renovable, reducen la dependencia de los combustibles fósiles y contribuyen a descarbonizar el sector (Bouman *et al.*, 2017).

Según Bouman *et al.*, los cascos reformados minimizan la resistencia al agua y atenúan el consumo de combustible hasta en un 10%, dependiendo del tipo y tamaño del buque; las innovaciones en este sentido incluyen diseños más esbeltos y alargados, que disminuyen la fricción con el agua para minimizar la resistencia y aprovechar mejor la potencia disponible para la propulsión. El recubrimiento del casco con materiales de última generación (pinturas especiales que reducen la fricción y evitan el crecimiento de organismos marinos, fenómeno conocido como *biofouling*), mantienen el rendimiento hidrodinámico del buque en el tiempo. Si se combina con diseños más ligeros con materiales como aleaciones de aluminio o compuestos de fibra de carbono, el peso total del casco es menor, sin comprometer su resistencia estructural (Wan, 2018).

Optimizando el diseño del casco para bajar las emisiones del CO₂ se obtienen descensos potenciales que oscilan entre el 4% y el 53%. Lindstad (2013) y Gilbert *et al.* (2014) destacan la importancia en la eficiencia operativa, mientras que investigaciones adicionales señaladas por Bouman *et al.* (2017) explican que el acero de alta resistencia -que es un material ligero-, puede disminuir el consumo de combustible en un rango de 0.1% al 22%, contribuyendo con el mismo objetivo.

La transición hacia fuentes de energía alternativas con el uso de cometas o velas rígidas también han demostrado reducir las emisiones hasta en un 50%, según Psaraftis (2016) o Traut *et al.* (2014), quienes presentaron modelos numéricos de dos tecnologías de energía eólica aplicadas a estos medios de transporte, un rotor Flettner y una cometa de remolque.

Bigi *et al.* (2020) estudiaron un modelo dinámico integrado para un barco remolcado por una cometa, combinando modelos independientes para ambos elementos, validados por separado, donde se compararon dos enfoques de acoplamiento (segregado y monolítico) y se introdujeron mejoras en el modelado de espacio de estados y las características aerodinámicas de la cometa. Se evaluaron las interacciones entre el barco y la cometa en aguas tranquilas y en condiciones de olas regulares, considerando la longitud del amarre, la trayectoria de la cometa y el gradiente del viento.

El enfoque monolítico fue más preciso al considerar el acoplamiento completo entre barco y cometa; en aguas tranquilas el acoplamiento disminuyó las fuerzas de la cometa, mientras que en olas regulares se observó un fenómeno de bloqueo beneficioso que aumentó la fuerza de remolque y redujo el balanceo del barco. Ignorar el componente vertical del movimiento permitió definir trayectorias de cometa más realistas y la interacción con las frecuencias naturales del barco y de las olas influyó en las amplitudes de balanceo y las fuerzas generadas (Bigi *et al.*, 2020).

Sistemas de propulsión

El análisis de las tecnologías de propulsión marina se centra en los motores de combustión interna (MCI), que son la tecnología predominante; el uso de diversos tipos (diésel, gasolina, gas natural, entre otros) ocurre dentro de la cámara de combustión del motor y son comúnmente utilizados en vehículos y maquinarias. Su eficiencia y capacidad lo convierte en un medio ideal para para generar la potencia necesaria para mover cargas -en el caso de las embarcaciones comerciales-.

Los MCI marinos son líderes en la flota mercante mundial, con casi el 98% de los barcos empleándolos; la popularidad se debe a su alta eficiencia, el bajo costo del combustible (*fueloil* pesado) y su madurez tecnológica. Llevan más de un siglo en el mercado, lo que ha permitido un amplio desarrollo de conocimiento y experiencia, resultando en un funcionamiento simple, avanzado y con una larga vida útil. Los principales tipos de motores son los de cuatro tiempos, de dos tiempos, y los de gas y gas-diésel (Mallouppas & Yfantis, 2021).

Como soluciones, Mallouppas & Yfantis explican que la industria está explorando opciones de combustibles alternos para minimizar su impacto ambiental y, en este sentido, el gas natural licuado ofrece como ventajas un número menor de emisiones de dióxido de carbono, por su mejor relación carbono-hidrógeno y la diversificación de las fuentes de energía; a pesar de ello, su uso todavía debe resolver el deslizamiento de metano y la necesidad de tener sistemas eficientes en motores de combustible dual de baja o alta presión.

Mediante electrólisis del agua se produce el hidrógeno verde, cuya energía requerida proviene de fuentes alternativas con bajas emisiones de dióxido de carbono o neutras en carbono, como la energía solar o la eólica, sin emitir GEI (Atilhan *et al.*, 2021). Este combustible enfrenta mayores retos técnicos, como la baja temperatura de ignición que puede causar preignición, y altas temperaturas de combustión que incrementan las emisiones de óxido de nitrógeno (NOx); por esta razón su uso se prefiere como un combustible secundario en motores diésel de encendido por compresión, para minimizar emisiones nocivas; a esto se le añade un alto coste que elimina su rentabilidad, considerándose para un futuro lejano (Elrhoul *et al.*, 2023).

El amoníaco no genera dióxido de carbono y, al no contener carbono ni azufre, es atractivo para efectos de propulsión marítima, porque cuenta con un índice de octano alto, haciéndolo adecuado para los motores diésel. En contraparte, a la combustión lenta, los problemas de ignición y las emisiones de NOx, se le suma el requerimiento de las regulaciones específicas debido a su toxicidad. En su método de producción depende de procesos en energía impulsados por combustibles fósiles, lo que contrarresta en gran medida los beneficios ambientales que podría ofrecer, evidenciando que su sustitución no sería una solución ambientalmente eficiente (Chavando *et al.*, 2024).

Nguyen *et al.* (2020) revisaron diversas configuraciones de sistemas de propulsión, tipos de energía y arquitecturas aplicables a buques marinos, además de analizar el diseño de buques inteligentes, demostrando que los sistemas de propulsión híbridos son adecuados para embarcaciones que operan a velocidades inferiores al 40% de su capacidad máxima, ofreciendo reducción de ruidos y mayor disponibilidad. Los sistemas eléctricos basados en corriente continua lograron amortiguar el consumo de combustible y las emisiones hasta

en un 20%; también estudiaron estrategias como la carga de baterías desde fuentes renovables por su disminución de costos y emisiones entre un 15% y 35%.

Entre las ventajas del estudio de Nguyen *et al.* se destacan la eficiencia energética en los sistemas de propulsión híbridos y eléctricos, así como la sostenibilidad al integrar fuentes de energía renovable para la carga de baterías. Los sistemas híbridos generan menos ruido, incrementando la operatividad en entornos sensibles, y los sistemas eléctricos garantizan una distribución de energía que minimizan las pérdidas de conversión. Entre las desventajas están las configuraciones avanzadas de control (como las estrategias híbridas de vehículos eléctricos paralelo, serie y serie-paralelo) que no pueden aplicarse directamente al diseño de buques; también existe un vacío en estudios que evalúen la implementación de estrategias avanzadas de control en el transporte marítimo y costos operativos iniciales altos a la hora de optimizar las arquitecturas de propulsión y los sistemas energéticos por las complejidades en el diseño.

Mejora de las rutas y planificación de la navegación

Contar con un sistema de planificación de navegación contribuye a la seguridad del barco, aumenta los beneficios económicos y limita el impacto ambiental; el elemento central de este sistema es un algoritmo que genera rutas óptimas entre el punto de partida y el destino del barco (Wang *et al.*, 2017). Se considera una forma de controlar los costos y las emisiones, porque aprovecha fuentes avanzadas de pronóstico meteorológico y modelos oceánicos; así se trazan rutas que minimizan el consumo de combustibles y se disminuye el impacto ambiental y los costos operativos de los buques. Bouman *et al.* (2017) señalan que la programación basada en condiciones meteorológicas puede reducir entre un 1 y 10% el consumo, dependiendo de la duración del viaje, la magnitud de las corrientes oceánicas y los vientos predominantes.

En esta línea, Wang *et al.* (2017) destacan que la tecnología de mejoramiento de rutas utiliza algoritmos que evalúan múltiples variables (estado del tiempo, corrientes marinas y restricciones contractuales) para determinar la velocidad y dirección más eficientes en tiempo real. Los sistemas de navegación son capaces de recomendar desaceleraciones en áreas donde las condiciones climáticas adversas puedan aumentar la resistencia al avance, reduciendo el consumo de combustible y mejorando la seguridad del buque y su tripulación.

En el mercado de enrutamiento meteorológico se utilizan cuatro algoritmos principales (de acuerdo con Wang *et al.*, 2017): los métodos isócronos e isópones modificados, la programación dinámica, la programación dinámica tridimensional y el algoritmo de Dijkstra. Cada uno presenta ventajas y limitaciones para estimar rutas que minimicen el tiempo de navegación o el consumo de combustible; el estudio de Wang *et al.* empleó datos de rendimiento a escala real, calculados mediante métodos ISO 2015 y mediciones de campo, con hallazgos que proporcionan una evaluación completa.

Los métodos isócronos e isópones modificados dividen el trayecto en intervalos de tiempo o distancia -respectivamente-, y generan múltiples trayectorias evaluando condiciones como velocidad y consumo de combustible. No obstante, aunque son eficientes, se vuelven menos precisos cuando los

escenarios se vuelven complejos debido a limitaciones de los bucles de isócrona, cruces por tierra y dificultades para cruzar estrechos (Szlapczynska & Smierzchalski, 2007). En estos casos, técnicas de programación dinámica descomponen el problema en etapas secuenciales, buscando soluciones óptimas para cada etapa y construyendo la ruta ideal mediante una estrategia de retroceso; aunque es eficaz en rutas bidimensionales, su complejidad aumenta cuando se le insertan variables adicionales (Wang *et al.*, 2017).

La programación dinámica tridimensional -añaden estos autores- incorpora una tercera dimensión, como el tiempo o las condiciones climáticas para facilitar la precisión en entornos variables a costa de un mayor procesamiento. Finalmente, el algoritmo de Dijkstra encuentra la ruta más corta en un gráfico de nodos y aristas basado en costos (tiempo o combustible), siendo rápido y directo, aunque menos flexible frente a cambios imprevistos en las condiciones de navegación.

Por último, se encuentra la economía de velocidad, que consiste en reducir la velocidad de los buques (*slow streaming*) para disminuir el consumo de combustible y las emisiones de GEI, pero debe estar balanceada con las demandas contractuales y las expectativas de entrega. Es una medida razonable y funcional, pero su éxito depende de la alineación entre los intereses de las navieras y los clientes, así como de las políticas regulatorias que incentiven su uso.

Tezdogan *et al.* (2016) realizaron un análisis que mostró que la velocidad lenta limita el consumo de combustible y las emisiones de CO₂; en particular, estimaron que la estrategia llega a disminuir hasta en 53% la potencia efectiva requerida y las emisiones de carbono, en comparación con una operación a 24 nudos en las mismas condiciones de oleaje. Se evidenció en los resultados una reducción en los movimientos del barco que mejoran la estabilidad general y comodidad a bordo en mares regulares e irregulares, considerando los portacontenedores y otro tipo de embarcaciones.

No obstante, identificaron desventajas en los problemas de seguridad en condiciones climáticas adversas y mares extremos, por la falta de potencia para maniobrar, aumentando el riesgo de inestabilidad y el balanceo paramétrico. Reconocen que esta es una estrategia a corto plazo para reducir la huella de carbono, por lo que su impacto debe complementarse con políticas sostenibles a largo plazo, pero se debe continuar la investigación para comprender los riesgos de seguridad y estimar los ahorros de combustible basados en la fluctuación de los precios según los escenarios.

Consideraciones finales

El debate sobre si la Organización Marítima Internacional debería implementar medidas para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte marítimo internacional refleja la situación compleja de equilibrar intereses económicos, políticos y ambientales. Países, organizaciones internacionales y académicos han dividido sus opiniones sobre la viabilidad y alcance de esas medidas. Durante la 65ª reunión del Comité de Protección del Medio Marino celebrada en mayo de 2013, el debate fue suspendido debido a una propuesta de los Estados Unidos que priorizaba medidas técnicas y

operativas para aumentar la eficiencia energética (Shi, 2016), evidenciando la dificultad para alcanzar consensos a nivel internacional.

El sector marítimo, responsable del 3% de las emisiones globales de GEI, debe avanzar para alcanzar los objetivos establecidos por la OMI para el año 2050. Las tecnologías y caminos disponibles, aunque prometedores, necesitan ser revisados críticamente, sobre todo porque las partes interesadas coinciden en la necesidad de evolucionar hacia la descarbonización, pero hacerlo dependerá de un marco que compendie incentivos financieros y políticas a nivel internacional.

Para alcanzar resultados tangibles, hay que viabilizar la implementación de políticas intermedias que impulsen el desarrollo y adopción de tecnologías limpias, como el uso de combustibles alternativos (hidrógeno verde, amoníaco) y mejoras en la eficiencia operativa (Bouman *et al.*, 2017; Duarte *et al.*, 2019), donde se ofrezca apoyo financiero a los países en desarrollo que podrían enfrentar barreras de tipo económico y tecnológico para implementar esas medidas. La descarbonización no es una cuestión técnica, es una oportunidad para reforzar la cooperación global y garantizar que las soluciones sean equitativas y sostenibles, al priorizar las acciones de manera concreta y mantener una visión colaborativa en beneficio del sector marítimo.

Conclusiones

La revisión de la estrategia de controlar las emisiones de GEI de la OMI para alcanzar emisiones netas cero para el año 2050 plantea una meta ambiciosa que refleja el creciente enfoque hacia la sostenibilidad, sin embargo, aunque la iniciativa es un paso positivo hacia la descarbonización del transporte marítimo, el desarrollo y adopción masiva de tecnologías sin emisiones de carbono o neutras en carbono (combustibles sostenibles, electrificación y captura de carbono) necesitan un alto nivel de inversión y un proceso de maduración para estas soluciones.

Los avances se observan en tecnologías que aún se encuentran en fases de prueba o son de implementación limitada, y la transición a los combustibles alternativos depende de su viabilidad económica y la capacidad para producirlos en volúmenes suficientes sin aumentar los costos operativos para los armadores. Si los costos alternos siguen siendo demasiado altos en comparación con los tradicionales, será normal observar la resistencia del sector privado.

Los objetivos propuestos afectan a la industria aumentando la complejidad del proceso, ya que armadores, diseñadores de barcos, proveedores de combustible y responsables políticos deben coordinarse de manera efectiva para que la transición sea posible. Las regulaciones e incentivos serán una parte importante, pero es probable que surjan situaciones relacionadas con la implementación de estas políticas a nivel mundial, considerando que las naciones y regiones tienen capacidades y visiones diferentes en cuanto al desarrollo tecnológico, la infraestructura y el compromiso con la sostenibilidad.

Aunque las medidas reglamentarias propuestas por la OMI buscan reducir las emisiones, algunas partes interesadas del sector podrían encontrar que las restricciones regulatorias sean demasiado coercitivas, y que lleguen a afectar la competitividad y las operaciones comerciales. Se debe trabajar en políticas equilibradas que impulsen la innovación sin sofocar la actividad económica

global, ya que el transporte marítimo sigue siendo un pilar fundamental del comercio internacional. Alcanzar la meta requiere de esfuerzos concertados y soluciones innovadoras, una evolución continua de las tecnologías, y políticas públicas para apoyar esa implementación sin afectar gravemente la competitividad ni la actividad económica del sector marítimo.

Referencias

- Al-Enazi, A., Okonkwo, E. C., Bicer, Y., & Al-Ansari, T. (2021). A review of cleaner alternative fuels for maritime transportation. *Energy Reports*, 7, 1962-1985. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.03.036>
- Ampah, J. D., Yusuf, A. A., Afrane, S., Jin, C., & Liu, H. (2021). Reviewing two decades of cleaner alternative marine fuels: Towards IMO's decarbonization of the maritime transport sector. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128871. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128871>
- Atilhan, S., Park, S., El-Halwagi, M. M., Atilhan, M., Moore, M., & Nielsen, R. B. (2021). Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 31, 100668. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.100668>
- Balcombe, P., Brierley, J., Lewis, C., Skatvedt, L., Speirs, J., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy conversion and management*, 182, 72-88. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.080>
- Bigi, N., Roncin, K., Leroux, J. B., & Parlier, Y. (2020). Ship towed by kite: Investigation of the dynamic coupling. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(7), 486. <https://doi.org/10.3390/jmse8070486>
- Bouman, E. A., Lindstad, E., Rialland, A. I., & Strømman, A. H. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping—A review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 408-421. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022>
- Calatayud, A. & Rivas Amiassorho, M.E. (2024). El futuro del transporte marítimo en la región: estrategias para la descarbonización y adaptación al cambio climático. En *Moviliblog*, BID. <https://n9.cl/3llji>
- Chavando, A., Silva, V., Cardoso, J., & Eusebio, D. (2024). Advancements and Challenges of Ammonia as a Sustainable Fuel for the Maritime Industry. *Energies*, 17(13), 3183. <https://doi.org/10.3390/en17133183>
- Comisión Europea. (2024). *Reducción de las emisiones del sector naviero*. <https://n9.cl/73h2l>
- Danish Maritime Authority. (2022). *New Partnership between Danish Maritime Authority and Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping*. <https://n9.cl/ps011>
- Elrhoul, D., Romero Gómez, M., & Naveiro, M. (2023). Review of green hydrogen technologies application in maritime transport. *International Journal of Green Energy*, 20(15), 1800-1825. <https://doi.org/10.1080/15435075.2023.2194384>
- Foretich, A., Zaimas, G. G., Hawkins, T. R., & Newes, E. (2021). Challenges and opportunities for alternative fuels in the maritime sector. *Maritime Transport Research*, 2, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.martra.2021.100033>

- Gilbert, P., Bows-Larkin, A., Mander, S., & Walsh, C. (2014). Technologies for the high seas: Meeting the climate challenge. *Carbon Management*, 5(4), 447-461. <https://doi.org/10.1080/17583004.2015.1013676>
- IMO. (2024). *Decarbonizing transport: a common goal*. <https://n9.cl/run0qr>
- Lindstad, E., Lagemann, B., Rialland, A., Gamlem, G. M., & Valland, A. (2021). Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 101, 103075. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103075>
- Lindstad, H. (2013). *Strategies and measures for reducing maritime CO2 emissions*. (Ph.D. Dissertation). Norwegian University of Science and Technology. <https://n9.cl/si9xn>
- Mallouppas, G., & Yfantis, E. A. (2021). Decarbonization in Shipping Industry: A Review of Research, Technology Development, and Innovation Proposals. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(4), 415. <https://doi.org/10.3390/jmse9040415>
- Nguyen, H. P., Hoang, A. T., Nizetic, S., Nguyen, X. P., Le, A. T., Luong, C. N., ... & Pham, V. V. (2020). The electric propulsion system as a green solution for management strategy of CO2 emission in ocean shipping: A comprehensive review. *International Transactions on electrical energy systems*, 31(11), e12580. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12580>
- OMC. (2024). *Transporte marítimo*. <https://n9.cl/c8uzk>
- OMI. (2015a). “El transporte marítimo: indispensable para el mundo”, seleccionado como lema del Día marítimo mundial de 2016. <https://n9.cl/nsspww>
- OMI. (2015b). *El Proyecto de asociaciones para la eficiencia energética marítima mundial (GloMEEP) se pone en marcha oficialmente en Singapur*. <https://n9.cl/mmysr>
- OMI. (2023). *Gases de efecto invernadero*. <https://n9.cl/9dkhl>
- Psarafitis, H. N. (2016). Green maritime transportation: Market based measures. In *Green transportation logistics: The quest for win-win solutions* (pp. 267-297). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17175-3_8
- Raucci C., McKinlay, C. & Karan, A. (2023). *The future of maritime fuels. What you need to know*. Lloyd’s Register Maritime Decarbonisation Hub. <https://n9.cl/temfp>
- RESOLUTION MEPC.304[72]. (2018). Note by the International Maritime Organization to the UNFCCC Talanoa Dialogue. Adoption of the initial imo strategy on reduction of ghg emissions from ships and existing imo activity related to reducing ghg emissions in the shipping sector, Adopted on 13 April.
- Shi, Y. (2016). Reducing greenhouse gas emissions from international shipping: Is it time to consider market-based measures? *Marine Policy*, 64, 123-134. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2015.11.013>
- Szlapczynska, J., & Smierzchalski, R. (2007). Adopted isochrone method improving ship safety in weather routing with evolutionary approach. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 14(06), 635-645. <https://doi.org/10.1142/S0218539307002842>

- Tezdogan, T., Incecik, A., Turan, O., & Kellett, P. (2016). Assessing the impact of a slow steaming approach on reducing the fuel consumption of a containership advancing in head seas. *Transportation Research Procedia*, 14, 1659-1668. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.131>
- Traut, M., Gilbert, P., Walsh, C., Bows, A., Filippone, A., Stansby, P., & Wood, R. (2014). Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes. *Applied Energy*, 113, 362-372. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.026>
- UNCTAD. (2024). *Review of maritime transport. Navigating maritime chokepoints*. United Nations.
- Wan, Z. (2018). Decarbonizing the international shipping industry: Solutions and policy recommendations. *Marine Pollution Bulletin*, 126, 428-435. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.11.064>
- Wang, H., Mao, W., & Eriksson, L. (2017, June). Benchmark study of five optimization algorithms for weather routing. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (Vol. 57748, p. V07BT06A023). American Society of Mechanical Engineers. <http://dx.doi.org/10.1115/OMAE2017-61022>