

Desarrollo de sistemas de propulsión híbridos para la reducción de emisiones en la industria naval

Development of hybrid propulsion systems for emission reduction in the shipbuilding industry

Basurto-Giler, Ángel Francisco¹; Anchundia-Hidalgo, Publio David²; Mieles-Álava, José Carlos³; Párraga-Chila, Cristhian Antonio⁴.

Recibido: 22/08/2024

Aceptado: 29/09/2024

Publicado: 31/10/2024

Cita: Basurto-Giler, Ángel F., Anchundia-Hidalgo, P. D., Mieles-Álava, J. C., & Párraga-Chila, C. A. (2024). Desarrollo de sistemas de propulsión híbridos para la reducción de emisiones en la industria naval. *Space Scientific Journal of Multidisciplinary*, 2(4), 58-72. <https://doi.org/10.63618/omd/ssjm/v2/n4/39>

Resumen

El estudio examina el desarrollo de sistemas de propulsión híbridos en la industria naval como alternativa para reducir emisiones contaminantes. Mediante una revisión bibliográfica sistemática de fuentes científicas entre 2015 y 2024, se identificaron configuraciones técnicas, tecnologías emergentes y ventajas operativas. Los resultados muestran que la combinación de motores térmicos y eléctricos con almacenamiento energético mejora la eficiencia, reduce el consumo de combustible y minimiza emisiones de CO₂, NO_x y SO_x, especialmente en maniobras portuarias. Además, estos sistemas permiten cumplir con normativas internacionales sin alterar la estructura de los buques. Se destacan avances en diseño modular, integración de energías renovables y su aplicabilidad en diferentes tipos de embarcaciones. En conclusión, la propulsión híbrida representa una solución intermedia viable hacia un transporte marítimo más sostenible, eficiente y regulatoriamente compatible. **Palabras clave:** propulsión híbrida naval; reducción de emisiones; eficiencia energética; sostenibilidad marítima; tecnologías limpias.

Abstract

The study examines the development of hybrid propulsion systems in the shipbuilding industry as an alternative to reduce polluting emissions. Through a systematic literature review of scientific sources between 2015 and 2024, technical configurations, emerging technologies and operational advantages were identified. The results show that the combination of thermal and electric motors with energy storage improves efficiency, reduces fuel consumption and minimizes CO₂, NO_x and SO_x emissions, especially in port maneuvers. In addition, these systems make it possible to comply with international regulations without altering the structure of the vessels. Advances in modular design, integration of renewable energies and their applicability in different types of vessels are highlighted. In conclusion, hybrid propulsion represents a viable intermediate solution towards a more sustainable, efficient and regulatory compatible maritime transport.

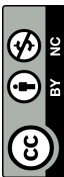
Keywords: naval hybrid propulsion; emission reduction; energy efficiency; maritime sustainability; clean technologies.

¹ Instituto Superior Tecnológico Luis Arboleda Martínez; Ecuador, Manta; <https://orcid.org/0009-0003-0792-2593>; a.basurto@istlam.edu.ec

² Instituto Superior Tecnológico Luis Arboleda Martínez; Ecuador, Manta; <https://orcid.org/0000-0002-8749-436X>; p.anchundia@istlam.edu.ec

³ Instituto Superior Tecnológico Luis Arboleda Martínez; Ecuador, Manta; <https://orcid.org/0000-0002-5421-6961>; j.mieles@istlam.edu.ec

⁴ Instituto Superior Tecnológico Luis Arboleda Martínez; Ecuador, Manta; <https://orcid.org/0009-0004-8943-8048>; c.parraga@istlam.edu.ec



1. Introducción

La industria naval, responsable del transporte de aproximadamente el 90 % del comercio mundial, enfrenta crecientes presiones para reducir su impacto ambiental, particularmente en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contaminantes atmosféricos. De acuerdo con la Organización Marítima Internacional (IMO, por sus siglas en inglés), el transporte marítimo internacional generó cerca del 2,89 % de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂) en 2018, cifra que podría incrementarse si no se implementan medidas tecnológicas eficaces para mitigar este fenómeno (International Maritime Organization, 2020). Ante este panorama, el desarrollo e implementación de sistemas de propulsión híbridos se presenta como una alternativa técnica viable y ambientalmente sostenible, permitiendo a la industria adaptarse a las regulaciones internacionales y a las demandas de un transporte marítimo más limpio (Soledispa Lino, 2024).

El principal problema radica en la elevada dependencia de combustibles fósiles por parte de los sistemas de propulsión convencionales en embarcaciones comerciales, militares y de transporte de pasajeros. Esta dependencia no solo contribuye significativamente a las emisiones de CO₂, óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x), sino que también limita el cumplimiento de las regulaciones ambientales emergentes, como las enmarcadas en el Anexo VI del Convenio MARPOL, que establece límites estrictos sobre las emisiones contaminantes provenientes de buques (IMO, 2020). La lenta adopción de tecnologías más limpias, junto con barreras económicas, técnicas y normativas, perpetúa la utilización de sistemas de propulsión ineficientes y contaminantes, lo que agudiza los efectos del cambio climático y la contaminación marina.

Los factores que agravan este problema incluyen, por una parte, la complejidad técnica de sustituir o complementar los sistemas de propulsión tradicionales en buques existentes, y por otra, la falta de incentivos económicos y marcos regulatorios uniformes a nivel global para promover la transición hacia tecnologías limpias. Además, las soluciones actuales, como los combustibles alternativos (metanol, hidrógeno o amoníaco), aún enfrentan obstáculos en términos de infraestructura, seguridad y costos de implementación (Bouman et al., 2017; Bala et al., 2021). En este contexto, los sistemas de propulsión híbridos, que combinan motores de combustión interna con fuentes de energía eléctrica o renovable, surgen como una opción intermedia y adaptable a diferentes tipos de embarcaciones, permitiendo una reducción sustancial de emisiones sin requerir una transformación total de la infraestructura marítima actual (Baldi et al., 2015).

La justificación del presente estudio radica en la necesidad urgente de identificar, sistematizar y evaluar críticamente las alternativas tecnológicas existentes en el campo de la propulsión híbrida naval, destacando sus beneficios, limitaciones y potencial de implementación a corto y mediano plazo (Canela Badrinas, 2018; Parets Servalls, 2023). Este enfoque resulta pertinente no solo por el creciente

interés de la comunidad científica y tecnológica en la descarbonización del transporte marítimo, sino también por la convergencia de políticas internacionales orientadas hacia la neutralidad climática, como lo estipula el Acuerdo de París. De igual forma, la revisión bibliográfica se justifica por la necesidad de compilar el conocimiento existente disperso en múltiples estudios técnicos y científicos, facilitando así una visión holística y comparativa de las soluciones tecnológicas más prometedoras (Hernández Rodríguez, 2021).

Desde el punto de vista de la viabilidad, este estudio es factible gracias a la disponibilidad de literatura científica actualizada indexada en bases de datos reconocidas como Scopus y Web of Science, que documentan avances recientes en sistemas híbridos aplicados al transporte marítimo. La investigación, de carácter documental, se sustenta en fuentes confiables, lo cual permite realizar una evaluación rigurosa, metodológicamente sólida y conforme con los estándares académicos internacionales (Mejía Cisneros et al., 2021). Asimismo, los resultados obtenidos podrán contribuir a la toma de decisiones en sectores industriales, académicos y gubernamentales interesados en transitar hacia un modelo energético más sostenible en el ámbito marítimo.

El objetivo de este artículo es analizar de manera crítica el desarrollo de sistemas de propulsión híbridos aplicados a la industria naval como estrategia para la reducción de emisiones contaminantes, mediante una revisión sistemática de la literatura científica reciente. Se busca identificar los principales tipos de configuraciones híbridas utilizadas, las tecnologías emergentes en almacenamiento y gestión de energía, así como los impactos ambientales, técnicos y económicos asociados a su implementación. Al hacerlo, se pretende ofrecer una visión actualizada y comprensiva del estado del arte, que sirva como base para futuras investigaciones y para el diseño de políticas públicas orientadas hacia la sostenibilidad del transporte marítimo (De Torres Niess, 2024).

En suma, la transición hacia sistemas de propulsión más limpios en el sector naval representa un imperativo ambiental y tecnológico de alto impacto global. La revisión de la literatura científica permitirá establecer las bases para comprender cómo los sistemas de propulsión híbridos pueden contribuir a este objetivo, enmarcados en un contexto multidisciplinario donde convergen la ingeniería, la energía, la economía y la política ambiental (Cerpa Bernal et al., 2016).

2. Materiales y Métodos

Este estudio se desarrolló bajo un enfoque exploratorio, de carácter cualitativo, centrado en una revisión bibliográfica sistemática orientada a analizar el desarrollo y la aplicabilidad de sistemas de propulsión híbridos en la industria naval, con énfasis en su contribución a la reducción de emisiones contaminantes. La elección de esta metodología responde a la necesidad de recopilar, sintetizar y evaluar

críticamente el conocimiento científico existente, permitiendo establecer el estado del arte sobre el tema desde una perspectiva amplia y multidisciplinaria.

La revisión se estructuró a partir de la formulación de preguntas guía orientadas a identificar: (i) los tipos de sistemas de propulsión híbrida desarrollados e implementados en buques; (ii) las tecnologías emergentes vinculadas a la gestión energética en contextos marítimos; y (iii) las implicaciones ambientales, técnicas y económicas derivadas de su implementación. Para ello, se procedió a una búsqueda exhaustiva de literatura científica en bases de datos académicas reconocidas, específicamente Scopus y Web of Science, seleccionando únicamente artículos publicados entre 2015 y 2024 con revisión por pares y alta relevancia temática.

La estrategia de búsqueda incluyó el uso de descriptores en inglés y español como: hybrid propulsion systems, marine emissions reduction, green shipping, energy efficiency in maritime transport, propulsión híbrida naval, entre otros. Se utilizaron operadores booleanos (AND, OR) y filtros por área temática (ingeniería, energía, transporte, ciencias ambientales) para delimitar la búsqueda a fuentes estrictamente relacionadas con el objetivo del estudio. Se priorizó la inclusión de artículos de investigación original, revisiones sistemáticas, estudios de caso y reportes técnicos con datos cuantificables sobre el rendimiento, eficiencia y sostenibilidad de los sistemas híbridos aplicados a buques.

Una vez recopiladas las fuentes, se llevó a cabo un proceso de análisis cualitativo mediante la lectura crítica de los textos seleccionados. Este análisis permitió clasificar los artículos según las tecnologías estudiadas, tipo de embarcación, impacto ambiental evaluado, barreras de implementación y grado de madurez tecnológica. Se excluyeron aquellas publicaciones que no presentaban evidencia empírica, carecían de aplicación al ámbito naval, o se centraban exclusivamente en propuestas conceptuales sin desarrollo técnico concreto.

Para garantizar la validez del análisis, se adoptó un enfoque comparativo que permitió identificar tendencias comunes, divergencias y vacíos en la literatura actual. Asimismo, se realizó una triangulación temática para relacionar los hallazgos técnicos con aspectos regulatorios y económicos, considerando el contexto de transición energética del sector marítimo. Todos los datos extraídos se organizaron en matrices temáticas, lo que facilitó la estructuración de los resultados en torno a ejes analíticos definidos.

La metodología seguida asegura una cobertura representativa del conocimiento disponible, permitiendo una comprensión profunda de los avances, limitaciones y oportunidades en el desarrollo de sistemas de propulsión híbridos para la reducción de emisiones en la industria naval. Este enfoque exploratorio ofrece una base sólida para futuros estudios empíricos y aplicaciones tecnológicas en contextos reales de operación marítima.

3. Resultados

3.1. Tipologías y configuraciones de sistemas de propulsión híbridos en la industria naval

La transformación hacia una industria marítima sostenible ha motivado la innovación en los sistemas de propulsión de los buques, siendo los sistemas híbridos una de las respuestas más relevantes frente a los desafíos ambientales y energéticos. Estos sistemas integran múltiples fuentes de energía, generalmente combinando motores térmicos con componentes eléctricos y almacenamiento energético, lo que permite mejorar la eficiencia operativa, reducir las emisiones y ofrecer mayor versatilidad de operación (De Torres Niess, 2024). A continuación, se exponen las principales tipologías y configuraciones de estos sistemas en función de su clasificación técnica, sus aplicaciones específicas, sus componentes predominantes y las tendencias emergentes de diseño.

3.1.1. Clasificación de los sistemas híbridos

Los sistemas de propulsión híbridos pueden clasificarse de acuerdo con la naturaleza de las fuentes energéticas utilizadas y la arquitectura del sistema de propulsión. En cuanto a las fuentes, se identifican combinaciones como diésel-eléctrico, gas-eléctrico, solar-eléctrico e híbridos que integran celdas de combustible con almacenamiento en baterías (Hernández Rodríguez, 2021). Estas configuraciones buscan reducir el consumo de combustibles fósiles, disminuir las emisiones contaminantes y ofrecer una operación más silenciosa y eficiente.

Desde el punto de vista arquitectónico, los sistemas híbridos pueden dividirse en tres categorías principales: paralelos, en serie y combinados. En los sistemas paralelos, tanto el motor térmico como el motor eléctrico pueden propulsar directamente el eje de la embarcación (Mejía Cisneros et al., 2021). En los sistemas en serie, el motor térmico actúa únicamente como generador de electricidad, siendo el motor eléctrico el responsable de la propulsión. Los sistemas combinados integran elementos de ambas configuraciones para maximizar la eficiencia operativa en diferentes condiciones de carga y navegación. Esta clasificación permite adaptar el sistema a distintos tipos de operación, mejorando el rendimiento energético y la flexibilidad de la embarcación (Zhou et al., 2023).

3.1.2. Aplicaciones según el tipo de embarcación

La adopción de sistemas híbridos varía según el tipo y función de la embarcación. Los transbordadores urbanos, especialmente aquellos que operan en rutas cortas y zonas de emisiones controladas, han sido de los primeros en implementar estas soluciones debido a su necesidad de operar en entornos regulados (De Torres Niess, 2024). Gracias a las rutas predecibles y las paradas frecuentes, estas embarcaciones pueden maximizar el uso de la propulsión eléctrica, reduciendo significativamente el consumo de combustible y las emisiones.

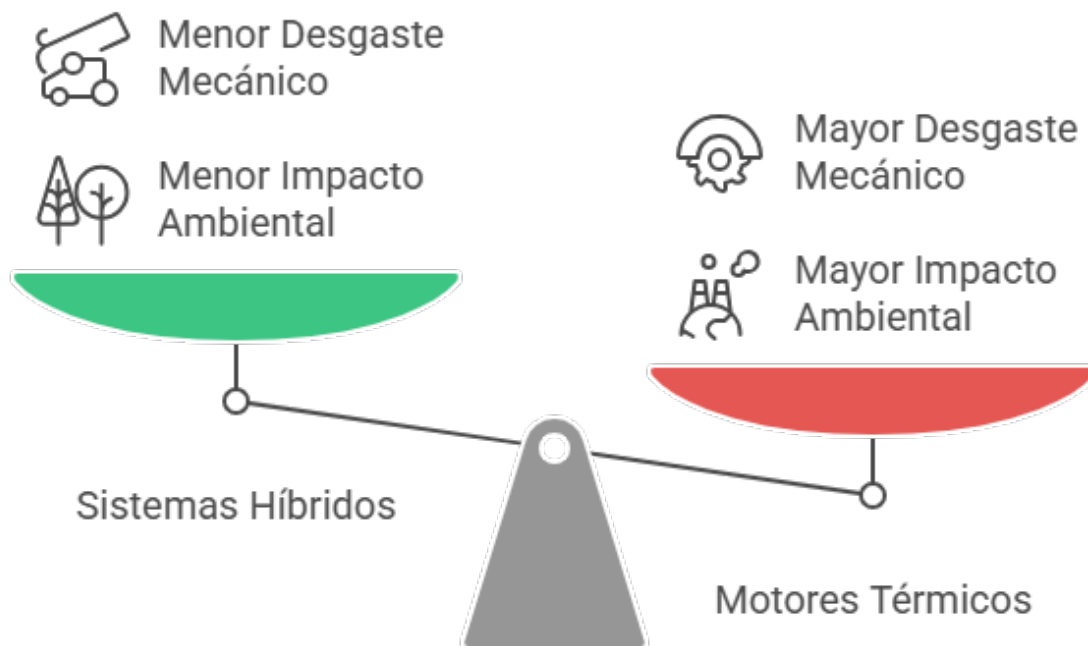
En el entorno portuario, los remolcadores han adoptado sistemas híbridos que les permiten alternar entre propulsión térmica y eléctrica según la demanda operativa.

Durante períodos de espera o maniobras a baja velocidad, el uso de energía eléctrica resulta más eficiente y silencioso, lo que también contribuye a reducir la contaminación acústica en áreas densamente pobladas (Baldi et al., 2015).

Los buques de apoyo en operaciones offshore también se benefician de los sistemas híbridos, especialmente durante actividades de posicionamiento dinámico o fondeo, donde el consumo de energía es variable y la eficiencia del motor térmico puede ser baja (Lindstad & Eskeland, 2016). En estos casos, los sistemas híbridos permiten mantener operaciones críticas con menor impacto ambiental y menor desgaste mecánico, en la figura 1 se demuestra que los sistemas híbridos ofrecen menores niveles de desgaste y contaminación en comparación con los motores térmicos convencionales.

Figura 1

Ventajas comparativas de los sistemas híbridos frente a motores térmicos en buques de apoyo



Nota: La imagen contrasta el rendimiento de los sistemas híbridos y térmicos en buques de apoyo, resaltando cómo los híbridos reducen tanto el impacto ambiental como el desgaste mecánico, posicionándose como una opción más eficiente y sostenible (Autores, 2024).

Por otro lado, embarcaciones militares, científicas y de investigación han comenzado a integrar soluciones híbridas debido a requerimientos operativos específicos, como la necesidad de reducir la firma acústica durante misiones estratégicas o actividades de monitoreo marino (Cerpa Bernal et al., 2016). En este segmento, la propulsión híbrida se convierte en una herramienta táctica y funcional, más allá de su valor energético.

3.1.3. Características técnicas predominantes

Los sistemas de propulsión híbridos incorporan una serie de componentes tecnológicos avanzados que permiten alcanzar altos niveles de eficiencia energética

y operativa (Bala et al., 2021). Uno de los elementos más relevantes son los motores eléctricos de alto rendimiento, capaces de operar en diferentes rangos de velocidad y carga sin pérdida significativa de eficiencia. Estos motores se complementan con bancos de baterías de litio, que ofrecen alta densidad energética, ciclos de vida prolongados y sistemas integrados de seguridad térmica.

La conversión de energía entre componentes se realiza mediante convertidores de potencia bidireccionales, que permiten el flujo energético tanto desde los generadores hacia las baterías como en sentido inverso. Esta capacidad es clave para gestionar la demanda de potencia en tiempo real y para permitir la recuperación de energía durante procesos de frenado o desaceleración (Lindstad & Eskeland, 2016).

Otro componente fundamental es el sistema de gestión energética, encargado de monitorizar y optimizar el uso de las diferentes fuentes de energía disponibles. Este sistema toma decisiones automáticas sobre cuándo activar los motores térmicos, cuándo operar en modo eléctrico y cómo distribuir la carga entre generadores y baterías. Además, se incorporan sistemas de recuperación de energía, que almacenan la energía no utilizada durante ciertas maniobras para su uso posterior, aumentando la eficiencia global del sistema.

3.1.4. Tendencias en el diseño modular y adaptable

El desarrollo de soluciones híbridas modulares se ha convertido en una de las tendencias más destacadas en el sector marítimo. Esta aproximación permite diseñar unidades energéticas compactas y estandarizadas que pueden integrarse fácilmente en diferentes tipos de embarcaciones, reduciendo los tiempos de instalación y facilitando los procesos de modernización de flotas existentes. El diseño modular también permite escalar el sistema de acuerdo con las necesidades operativas, añadiendo módulos adicionales según la demanda energética (Bouman et al., 2017).

Los fabricantes han apostado por la creación de módulos energéticos integrados que combinan generadores, motores eléctricos, sistemas de almacenamiento y control en una única plataforma, lo cual facilita tanto la instalación inicial como el mantenimiento posterior (Mejía Cisneros et al., 2021). Esta modularidad también favorece la flexibilidad operativa, permitiendo modificar la arquitectura energética del buque sin alterar significativamente su estructura o distribución interna.

Otra tendencia emergente es la integración de fuentes de energía renovables, como paneles solares y sistemas de captación eólica, dentro de estos módulos híbridos. Esto permite operar en modo de cero emisiones durante ciertas fases del trayecto, especialmente en zonas urbanas, puertos o áreas protegidas. Asimismo, se están desarrollando soluciones para recarga rápida de baterías y sistemas híbridos conectados a redes inteligentes portuarias, lo que abre la posibilidad de sincronizar el consumo energético del buque con la oferta de energía limpia en tierra (Cerpa Bernal et al., 2016).

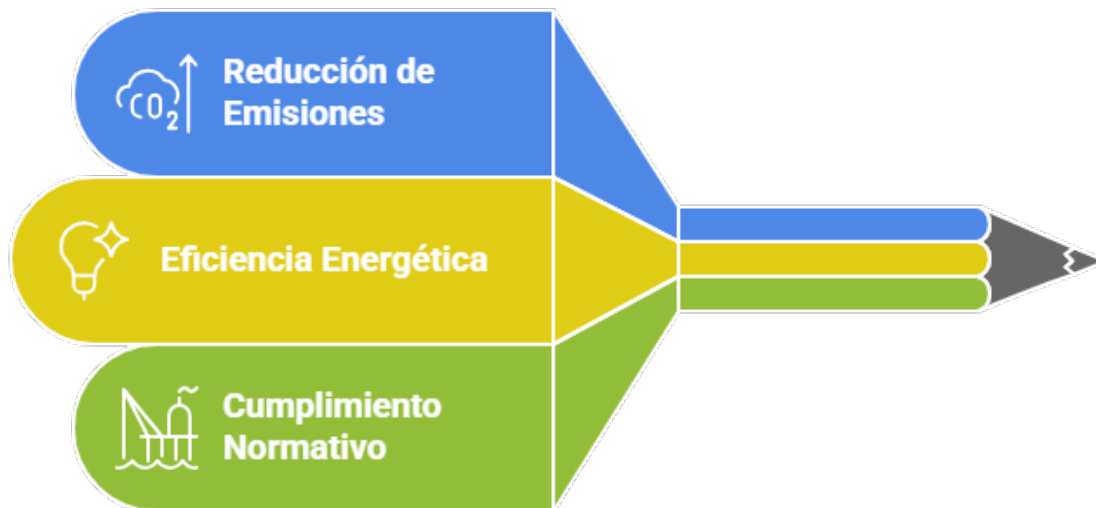
Estas innovaciones consolidan la propulsión híbrida como una alternativa viable, eficiente y escalable para afrontar los retos ambientales del transporte marítimo, ofreciendo una respuesta tecnológica adaptable a las exigencias operativas de cada segmento del sector naval.

3.2. Impacto ambiental y eficiencia energética de los sistemas híbridos navales

La incorporación de sistemas de propulsión híbridos en embarcaciones representa una de las estrategias más relevantes en la transición energética del sector marítimo. Estos sistemas, al integrar tecnologías térmicas y eléctricas, permiten no solo una mejora operativa sustancial, sino también una respuesta eficaz frente a los desafíos ambientales que enfrenta la industria naval. Este apartado analiza los beneficios más evidentes de estas tecnologías, entre ellos, la reducción de emisiones contaminantes, el incremento de la eficiencia energética y la capacidad de cumplimiento de normativas ambientales internacionales cada vez más exigentes (Raptodimos & Georgopoulou, 2020), la figura 2 demuestra como el camino hacia un futuro marítimo más verde se basa en reducir emisiones, optimizar la energía y cumplir con las normativas ambientales.

Figura 2

Estrategias clave para una navegación sostenible



Nota: La imagen simboliza una dirección clara hacia la sostenibilidad en el sector naval, integrando tres pilares fundamentales: la reducción del impacto ambiental, la eficiencia energética y el cumplimiento regulatorio, esenciales para una transición ecológica efectiva (Autores, 2024).

3.2.1. Reducción de emisiones contaminantes

Uno de los impactos ambientales más significativos de la propulsión híbrida es la disminución de las emisiones atmosféricas generadas por los buques. La combinación de motores térmicos con propulsión eléctrica permite reducir de forma considerable la liberación de gases contaminantes, especialmente dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y material particulado. Esta reducción es más evidente en maniobras portuarias, fases de baja velocidad o en

operación en zonas de emisión controlada, donde se puede optar por un funcionamiento completamente eléctrico (Soledispa Lino, 2024).

La posibilidad de apagar los motores térmicos durante ciertas operaciones y sustituirlos por energía almacenada en baterías contribuye no solo a disminuir las emisiones directas, sino también a reducir la contaminación acústica y las vibraciones, lo que tiene un impacto positivo en la fauna marina (Parets Servalls, 2023). En embarcaciones que realizan trayectos cortos o regulares, como ferris y remolcadores, el uso de sistemas híbridos ha demostrado un cambio notable en el perfil de emisiones, incluso en contextos operativos exigentes.

El uso de sistemas híbridos también permite adaptar la operación del buque a zonas con legislaciones ambientales estrictas sin necesidad de modificar la infraestructura principal de propulsión, lo que representa una ventaja tanto técnica como económica para armadores que operan en rutas internacionales o en regiones costeras altamente reguladas (De Torres Niess, 2024).

3.2.2. Mejora del rendimiento energético

Los sistemas híbridos permiten una gestión más eficiente de la energía a bordo, ya que posibilitan la utilización de las fuentes disponibles de manera flexible y optimizada. En comparación con los motores térmicos convencionales, que presentan una eficiencia reducida en condiciones de baja carga, los sistemas híbridos permiten operar en un rango más amplio de eficiencia, ajustando automáticamente el uso del motor térmico, el motor eléctrico o ambos según las condiciones de carga y navegación (Parets Servalls, 2023).

El uso de sistemas de gestión energética integrados permite distribuir la energía entre los distintos subsistemas del buque, reduciendo las pérdidas y optimizando el consumo en función de la demanda real. Esta gestión inteligente incluye la priorización del uso de energía almacenada, la modulación del funcionamiento de los generadores y la posibilidad de utilizar energía recuperada en fases de desaceleración o frenado.

Además, la propulsión híbrida reduce el desgaste de los motores térmicos al evitar su operación continua en condiciones no óptimas, lo que se traduce en una prolongación de la vida útil de los equipos, menores costos de mantenimiento y una mayor confiabilidad del sistema en su conjunto. También permite reducir la necesidad de sobredimensionar los sistemas propulsivos, ya que la potencia adicional puede ser suministrada por el componente eléctrico cuando sea necesario (Canela Badrinas, 2018).

El resultado es un sistema más eficiente, adaptable y menos dependiente de la operación a plena carga, lo cual representa un avance técnico significativo en comparación con los modelos de propulsión tradicionales.

3.2.3. Cumplimiento de normativas internacionales

El marco regulatorio internacional en materia ambiental ha establecido objetivos ambiciosos para la reducción de emisiones en el transporte marítimo, lo que ha obligado al sector a buscar soluciones tecnológicas compatibles con estos estándares (Canela Badrinas, 2018). En este escenario, los sistemas híbridos ofrecen una alternativa altamente eficaz para cumplir con las normativas vigentes y con las proyecciones de descarbonización a largo plazo.

La capacidad de operar temporalmente en modo eléctrico permite a los buques adaptarse a las exigencias de las zonas de control de emisiones, sin recurrir al uso de combustibles alternativos costosos o a tecnologías aún en desarrollo. Esto es particularmente relevante para embarcaciones que transitan entre regiones con diferentes grados de regulación ambiental, ya que la flexibilidad del sistema híbrido permite responder a estos cambios sin comprometer la operatividad del buque (Soledispa Lino, 2024).

Además, las metas de reducción de intensidad de carbono en el transporte marítimo internacional, planteadas por organismos globales, han generado una presión creciente sobre las flotas comerciales para modernizar sus sistemas propulsivos. La adopción de tecnologías híbridas se alinea con estas metas y se presenta como una solución intermedia viable hacia la implementación futura de sistemas completamente libres de emisiones (Sattler et al., 2020).

En paralelo, la tendencia global hacia la sostenibilidad ha propiciado el desarrollo de incentivos financieros, fiscales y logísticos para la adopción de sistemas híbridos, lo cual mejora la viabilidad económica de su implementación y acelera su integración en la flota mundial (Soledispa Lino, 2024). Esto convierte a la propulsión híbrida no solo en una solución técnica adecuada, sino también en una herramienta estratégica para asegurar el cumplimiento regulatorio y la competitividad operativa en el mercado marítimo internacional.

4. Discusión

La integración de sistemas de propulsión híbridos en la industria naval constituye una respuesta estratégica frente a los desafíos ambientales, regulatorios y operativos que enfrenta el transporte marítimo contemporáneo. Esta tecnología, al combinar motores térmicos y eléctricos junto con sistemas de almacenamiento energético avanzados, ofrece una vía intermedia viable entre la propulsión convencional basada en combustibles fósiles y las soluciones completamente libres de emisiones (Hernández Rodríguez, 2021). Su capacidad para mejorar simultáneamente la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental convierte a los sistemas híbridos en una herramienta esencial para una transición tecnológica gradual, pragmática y funcional.

Desde el punto de vista técnico, la versatilidad de estos sistemas permite su adaptación a diferentes arquitecturas de propulsión y perfiles operativos. Ya sea

mediante configuraciones paralelas, en serie o combinadas, los sistemas híbridos se adecuan tanto a buques de nueva construcción como a embarcaciones en proceso de modernización (Bouman et al., 2017). Esta flexibilidad facilita su implementación en una amplia gama de unidades, desde transbordadores de corta distancia hasta remolcadores, buques de abastecimiento offshore y embarcaciones científicas o militares. La capacidad de operar en modos de propulsión diferenciados según las condiciones de navegación y demanda energética amplía las posibilidades de gestión eficiente del recurso energético disponible.

En términos ambientales, la reducción de emisiones contaminantes constituye uno de los aportes más directos y cuantificables de esta tecnología. El funcionamiento en modo eléctrico durante operaciones portuarias, maniobras de atraque y navegación en zonas de control de emisiones permite disminuir de forma significativa las emisiones de gases como dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, así como la emisión de partículas y ruido subacuático (De Torres Niess, 2024). Estas ventajas tienen un impacto favorable tanto en la calidad del aire de entornos urbanos costeros como en la preservación de ecosistemas marinos sensibles. Además, el uso de baterías como fuente primaria en fases específicas de la operación reduce la dependencia del motor térmico, minimizando el desgaste mecánico y las pérdidas por ineficiencia (Mejía Cisneros et al., 2021).

La eficiencia energética también se ve incrementada gracias a la gestión inteligente de la energía a bordo. Los sistemas de control integrados permiten distribuir la carga energética entre generadores, motores y baterías, optimizando el consumo en función de la demanda real (Cerpa Bernal et al., 2016). Esta característica es especialmente útil en escenarios operativos variables, donde la propulsión tradicional pierde eficiencia al operar fuera de su punto óptimo. Asimismo, los sistemas de recuperación energética, como el frenado regenerativo y la conversión de calor residual, contribuyen a un uso más racional del recurso energético, reduciendo el consumo global de combustible y los costos operativos asociados (Hernández Rodríguez, 2021).

Desde una perspectiva regulatoria, los sistemas híbridos ofrecen una solución robusta para el cumplimiento de normativas ambientales internacionales cada vez más exigentes. La posibilidad de operar en modo de cero emisiones en determinadas fases del viaje permite a las embarcaciones adaptarse a marcos regulatorios heterogéneos sin necesidad de realizar cambios estructurales profundos. Esto resulta particularmente importante en rutas internacionales, donde las condiciones de acceso a los puertos y las regulaciones ambientales varían significativamente. Además, los compromisos internacionales orientados a la descarbonización del transporte marítimo posicionan a los sistemas híbridos como una tecnología puente hacia soluciones energéticas totalmente sostenibles.

A pesar de sus múltiples ventajas, la adopción masiva de la propulsión híbrida enfrenta desafíos que deben ser considerados. Entre ellos destacan el coste inicial

de inversión, la necesidad de infraestructura de soporte en puertos y la capacitación técnica requerida para su operación y mantenimiento. Aunque estos obstáculos han comenzado a superarse mediante el desarrollo de soluciones modulares, políticas de incentivos y avances tecnológicos, todavía representan una barrera en contextos donde los márgenes económicos son limitados o donde la legislación ambiental no impone estándares elevados.

En cualquier caso, los sistemas de propulsión híbridos se consolidan como una solución estratégica de mediano plazo para la industria naval. Su capacidad para integrarse con otras tecnologías emergentes, como las celdas de combustible, la energía solar o los sistemas eólicos marinos, permite vislumbrar un futuro donde estas plataformas híbridas evolucionen hacia configuraciones completamente libres de emisiones (Soledispa Lino, 2024). En este sentido, su adopción no solo responde a una necesidad inmediata de cumplimiento normativo, sino también a una visión estructural de largo plazo basada en la sostenibilidad, la eficiencia operativa y la innovación tecnológica.

5. Conclusiones

Las transformaciones que está experimentando la industria naval en materia de sostenibilidad, eficiencia energética y cumplimiento normativo exigen la adopción de soluciones tecnológicas que permitan una transición ordenada, progresiva y eficaz hacia modelos operativos de bajas o nulas emisiones. En este contexto, los sistemas de propulsión híbridos representan una respuesta técnica consolidada, capaz de articular el desempeño energético con los compromisos ambientales sin comprometer la funcionalidad y versatilidad de las embarcaciones. Su integración permite enfrentar simultáneamente tres de los principales desafíos del transporte marítimo: la reducción de emisiones contaminantes, el incremento de la eficiencia energética y el cumplimiento de estándares internacionales cada vez más exigentes.

Los sistemas híbridos, al combinar motores térmicos con propulsión eléctrica y dispositivos de almacenamiento energético, constituyen una solución intermedia de alta viabilidad tecnológica y operativa. La flexibilidad de configuración —ya sea en arquitectura paralela, en serie o combinada— permite su implementación en una amplia diversidad de embarcaciones, desde transbordadores urbanos hasta remolcadores, buques offshore y unidades científicas o militares. Esta capacidad de adaptación, junto con el diseño modular y escalable, facilita su integración tanto en embarcaciones de nueva construcción como en procesos de modernización de flotas existentes, lo que convierte a la propulsión híbrida en una tecnología estratégicamente transversal y evolutiva.

Desde el punto de vista ambiental, la capacidad de operar en modo eléctrico durante fases críticas —como maniobras portuarias, navegación costera o estancias en fondeo— permite reducir significativamente la emisión de gases de efecto

invernadero, óxidos de nitrógeno y azufre, así como partículas finas y ruido subacuático. Estos beneficios son particularmente relevantes en zonas de control de emisiones, áreas costeras densamente habitadas o regiones ecológicamente sensibles, donde la mitigación del impacto ambiental marítimo se ha convertido en una prioridad regulatoria. La propulsión híbrida, por tanto, no solo responde a una necesidad técnica, sino también a una exigencia ética y normativa alineada con los objetivos globales de sostenibilidad.

En el ámbito de la eficiencia energética, los sistemas híbridos ofrecen ventajas considerables al permitir una gestión más inteligente, dinámica y adaptativa del consumo energético a bordo. La posibilidad de distribuir la carga entre múltiples fuentes según la demanda operativa mejora el rendimiento del sistema, reduce el consumo específico de combustible y optimiza el funcionamiento de los motores térmicos, evitando su operación en condiciones ineficientes. A ello se suman tecnologías complementarias como los sistemas de recuperación energética y los sistemas de gestión energética integrados, que permiten maximizar el aprovechamiento de la energía generada y almacenada, reduciendo las pérdidas y aumentando la autonomía operativa de las embarcaciones.

En lo normativo, la propulsión híbrida representa una solución eficaz para cumplir con los marcos regulatorios internacionales que buscan reducir la huella ambiental del transporte marítimo. La posibilidad de operar temporalmente en modo de cero emisiones, sin alterar la arquitectura principal de propulsión, permite a los armadores adecuarse a los requisitos de zonas reguladas sin necesidad de adoptar tecnologías emergentes aún inmaduras o excesivamente costosas. En este sentido, los sistemas híbridos actúan como tecnologías puente, facilitando el cumplimiento de metas intermedias de descarbonización al tiempo que preparan la infraestructura y el personal para la adopción de tecnologías más avanzadas en el futuro.

No obstante, su adopción a gran escala todavía enfrenta desafíos estructurales y económicos. El coste inicial de implementación, la escasez de infraestructura portuaria adaptada a la recarga energética, y la necesidad de formación especializada para la operación y mantenimiento de estos sistemas constituyen obstáculos reales que deben abordarse mediante políticas públicas, incentivos económicos y cooperación entre el sector público y privado. Superar estas barreras permitirá acelerar la transición hacia un modelo marítimo más limpio y resiliente, consolidando una nueva generación de embarcaciones capaces de cumplir con las demandas operativas sin comprometer los objetivos ambientales.

En definitiva, la propulsión híbrida representa mucho más que una solución técnica temporal: se configura como una plataforma de transición estratégica que permite avanzar hacia un transporte marítimo sostenible, inteligente y regulatoriamente compatible. Su potencial para integrarse con tecnologías emergentes, su capacidad de reducir el impacto ambiental de forma inmediata, y su adaptabilidad a distintos contextos operativos, la convierten en un pilar clave en la evolución del sistema

marítimo global. La consolidación de esta tecnología no solo contribuirá al cumplimiento de los compromisos internacionales de reducción de emisiones, sino que también fortalecerá la eficiencia, competitividad y responsabilidad ambiental de uno de los sectores más relevantes para el comercio y la economía mundial.

CONFLICTO DE INTERESES

“Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses”.

Referencias Bibliográficas

- Alcivar Soria, E. E. (2021). La influencia del liderazgo en el clima organizacional de los docentes universitarios: un estudio exploratorio. *Journal of Economic and Social Science Research*, 1(4), 28–42. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v1/n4/40>
- Bala, B. K., Hossain, M. M., & Baten, M. A. (2021). Renewable energy integration in maritime transport: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 138, 110685.
- Baldi, F., Johnson, H., Gabriellii, C., Andersson, K. (2015). Energy and exergy analysis of ship energy systems – the case study of a chemical tanker. *International Journal of Thermodynamics*, 18(2), 82-93.
- Bouman, E. A., Lindstad, E., Riialand, A., & 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>
- Canela Badrinas, V. (2018, May). Desarrollo del sistema de propulsión diésel-eléctrico de un catamarán (Trellal Final de Grau). UPC, Facultat de Nàutica de Barcelona, Departament de Ciència i Enginyeria Nàutiques. <http://hdl.handle.net/2117/117057>
- Cerpa Bernal, R. M., Mónico Muñoz, L. F., Cortés Ruiz, D. F., Mustafa Prieto, S. W., y Bonilla Candidata, A. (2016). Selección del sistema de propulsión de un vehículo urbano con bajo consumo de combustible-Propulsion System Selection Applied in a Low Fuel Consumption Urban Vehicle. *Ingenium*, 17(33), 41–53. <https://doi.org/10.21500/01247492.2153>
- De Torres Niess, A. (2024, July). Estudio y análisis de los sistemas de propulsión naval basados en hidrógeno. Aplicación a una embarcación menor (Trellal Final de Grau). UPC, Facultat de Nàutica de Barcelona, Departament de Ciència i Enginyeria Nàutiques. <http://hdl.handle.net/2117/412428>
- Franco Intriago, M. E., & Loor Moncayo, S. A. (2021). La ética del control de la contaminación ambiental automotriz en el Ecuador. *Journal of Economic and Social Science Research*, 1(1), 1–14. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/V1/N1/16>

- Hernández Rodríguez, P. (2021). *Baterías y propulsión híbrida* [Trabajo de Fin de Grado, Universidad de La Laguna]. RIULL. <https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/22483>
- International Maritime Organization. (2020). *Fourth IMO GHG Study 2020*. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>
- Lindstad, H., & Eskeland, G. S. (2016). Environmental regulations in shipping: Policies leaning towards globalization of environmental standards. *Energy Policy*, 96, 93–103.
- Mejía Cisneros, Guillermo, Ordoñez Casanova, Elsa, & Trejo Mandujano, Héctor Alejandro. (2021). Tecnologías en los sistemas de propulsión híbridos: revisión de literatura. *RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 12(23), e045. Epub 14 de febrero de 2022. <https://doi.org/10.23913/ride.v12i23.1078>
- Parets Servalls, R. M. (2023, July). Análisis de las medidas necesarias para la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera en el sector de los yates de grandes esloras (Treball Final de Grau). UPC, Facultat de Nàutica de Barcelona, Departament de Ciència i Enginyeria Nàutiques. <http://hdl.handle.net/2117/392120>
- Raptodimos, Y., & Georgopoulou, C. A. (2020). Comparative analysis of hybrid propulsion systems for marine applications. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(4), 242.
- Sattler, K., Madlener, R., & Buhl, H. U. (2020). Optimal operation of hybrid propulsion systems in maritime logistics: A case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 82, 102300.
- Soledispa Lino, E. J. (2024). *Estudio sobre la viabilidad de la aplicación de pilas de combustible en sistemas de propulsión de barcos pequeños* (Tesina). Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Ecuador. <https://repositorio.uleam.edu.ec/handle/123456789/5795>
- Zhou, Y., Li, Z., Zhu, J., & Wang, X. (2023). Design and optimization of hybrid power systems in green shipping: A multi-objective approach. *Ocean Engineering*, 270, 113682.