

ARTÍCULO - Tesis Premiadas Convocatoria de Premios RADE 2024

Sinergias entre eficiencia energética y reducción del ruido submarino en el transporte marítimo: innovaciones tecnológicas

Synergies between Energy Efficiency and Underwater Noise Reduction in Maritime Transport: Technological Innovations

Luis Alfonso Díaz-Secades*

Departamento de Ciencia y Tecnología Náutica, Universidad de Oviedo, España.

secadesalfonso@uniovi.es

RESUMEN

El aumento del nivel de emisiones de gases nocivos, atribuido principalmente a la actividad humana, está provocando un aumento en la temperatura global. Este calentamiento a su vez está dando lugar a fenómenos meteorológicos extremos. Aunque el transporte marítimo representa únicamente el 2,89% de las emisiones de CO₂ antropogénicas, el incremento en la actividad del sector plantea preocupaciones sobre su impacto ambiental futuro. La Organización Marítima Internacional ha implementado medidas de eficiencia energética como el indicador de intensidad de carbono, la cual aún necesita ser revisado ya que situaciones como el tiempo que el buque está parado por tareas de mantenimiento y los viajes cortos pueden distorsionar los resultados. Añadido a los inconvenientes del cálculo, resulta necesaria la inclusión de las emisiones de metano y óxido nitroso debido a su contribución al efecto invernadero. La OMI promueve el uso de nuevos combustibles para la descarbonización, pero es consciente de que a corto plazo las medidas de eficiencia energética tienen una mayor disponibilidad y versatilidad. Dentro de los sistemas de eficiencia energética que puede equipar un buque existe una serie de equipos que también mitigan el ruido radiado al exterior, lo que protegería a la fauna que habita las rutas del transporte marítimo. En este aspecto, los generadores termoeléctricos pueden resultar una solución prometedora para reducir el ruido emitido aprovechando el calor residual radiado por los equipos a bordo.

PALABRAS CLAVE: Eficiencia energética; organización marítima internacional; recuperación de calor residual; generadores termoeléctricos; ruido submarino procedente de los buques; descarbonización.

ABSTRACT

The rise in harmful gas emissions, primarily caused by human activity, is contributing to global warming and resulting in extreme weather events. While shipping only accounts for 2.89% of anthropogenic CO₂ emissions, the sector's growth raises concerns about its future environmental impact. The International Maritime Organization has implemented energy efficiency measures, including the carbon intensity indicator. However, this indicator still needs to be reviewed as situations such as vessel downtime for maintenance and short voyages can distort the results. Additionally, the inclusion of methane and nitrous oxide emissions is necessary due to their contribution to the greenhouse effect. IMO promotes the use of new fuels for decarbonization but acknowledges that in the short term, energy efficiency measures are more widely available and versatile. Within the energy efficiency systems that a ship can be equipped with, there is a series of equipment that also mitigate the underwater radiated noise, which would protect the fauna that inhabits main maritime transport routes. Regarding energy efficiency and underwater radiated noise mitigation, thermoelectric generators may be a promising solution for reducing noise radiation by recovering waste heat radiated by onboard equipment.

KEYWORDS: Energy efficiency; international maritime organization; waste heat recovery; thermoelectric generators; underwater radiated noise from ships; decarbonization.

* El autor fue galardonado con el Premio Salvador Cascales Lozano en la Convocatoria de Premios RADE 2023 a la mejor tesis doctoral por su tesis *Reaprovechamiento energético de motor diésel marino mediante generadores termoeléctricos*.

1. CONTAMINACIÓN AÉREA, CAMBIO CLIMÁTICO Y SALUD

Desde el inicio de la primera Revolución Industrial hasta nuestros días, el planeta Tierra ha sufrido un aumento de su temperatura global. El Sexto Informe de Evaluación sobre el cambio climático elaborado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en el año 2023 destacó que la temperatura media ha aumentado en aproximadamente 1,09°C (Calvin et al., 2023). En gran parte, este cambio está relacionado con la influencia de diversas actividades humanas. Aunque el efecto invernadero producido por altas concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) comenzó a ser conocido en 1856 gracias a los estudios de Eunice Foote (Foote, 1856), el efecto de la intervención humana en el clima no quedó demostrado hasta años después. En 1960, Charles Keeling publicó los primeros resultados sobre sus estudios acerca de la variación de la concentración de CO₂ en la atmósfera (Keeling, 1960). Entre los años 1957 y 1960, Keeling registró concentraciones de entre 310,5 y 315,3 partes por millón de CO₂ en el observatorio de Mauna Loa, Hawaii. En el período comprendido entre los años 2021 y 2024, el mismo observatorio registró valores de entre 416,4 y 426,2 ppm CO₂ (Jacobson et al., 2023). La influencia de este aumento en la concentración de CO₂ atmosférico en el calentamiento global ha sido ampliamente investigada e incluso existe la capacidad de realizar pronósticos certeros. Desde 1977 investigadores de la compañía ExxonMobil realizaron predicciones que posteriormente, y comparadas con los datos medidos, resultaron tener un nivel de precisión elevado (Supran et al., 2023).

Además del dióxido de carbono, otros gases emitidos a la atmósfera fruto de la actividad humana poseen potencial de calentamiento global (por sus siglas en inglés, GWP). Entre ellos, cabe destacar las emisiones de metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), y fluidos refrigerantes. En el caso del CH₄, su valor GWP₁₀₀ se sitúa en la horquilla 27,2 – 29,8 en función de su procedencia, y para el N₂O este valor asciende hasta 273. Ambos gases son residuos habituales de los distintos procesos industriales, la agricultura y el transporte, y en el año 2021 supusieron 13 480 millones de toneladas de CO₂ equivalente (10 510 millones ton CO_{2eq} CH₄ y 2 970 millones ton CO_{2eq} N₂O) las cuales se suman a los 41 120 millones de toneladas de CO₂ emitidas a nivel mundial (Jones et al., 2023). Mientras que el desglose de las emisiones de CO₂, debido a su preponderancia, reflejan fielmente las emisiones totales de gases de efecto invernadero, la distribución de las emisiones de metano resulta diferente. A escala mundial, la agricultura es el sector que más contribuye a las emisiones de CH₄. La mayor parte de este metano procede de la ganadería, aunque la producción de arroz también contribuye en gran medida. Además, las descargas no intencionadas de gases procedentes de equipos presurizados, emisiones fugitivas, liberan una cantidad significativa de metano. Esto puede ocurrir, por ejemplo, cuando el gas se transporta por tuberías en mal estado. En tercer lugar, se encontraría la contribución debida

a la descomposición de materiales orgánicos. Por otra parte, la mayoría de las emisiones antropogénicas de óxido nitroso proceden de la utilización de fertilizantes nitrogenados en la agricultura, especialmente desde la década de 1950 (Ritchie et al., 2020).

El calentamiento global provocado por las distintas emisiones antropogénicas lleva asociadas consecuencias de alto impacto como inundaciones, incremento del nivel del mar y desertificación (Hanlon et al., 2021). Un ejemplo de las consecuencias del cambio climático que afecta al sector marítimo es el estado actual del Canal de Panamá. Esta vía de tránsito, por la que circula el 5% del comercio mundial, está sufriendo los efectos del fenómeno El Niño por el cual los vientos se debilitan y las aguas cálidas son empujadas hacia la costa oeste americana. Esto ha provocado la ausencia de lluvias necesaria para el funcionamiento del Canal, forzando a las autoridades a recortar el tráfico marítimo en un 49% (UNCTAD, 2024). El alcance global que presenta esta problemática ha provocado que el control de las emisiones de efecto invernadero se haya vuelto un asunto prioritario. Continuando las acciones emprendidas con la firma del Protocolo de Kioto en 1997, Naciones Unidas aprobó la Agenda para el Desarrollo Sostenible 2030 (United Nations, 2015). La Agenda comprende 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que buscan fomentar la prosperidad del planeta y sus habitantes. Desde el punto de vista medioambiental, la lucha contra el cambio climático provocado por la actividad humana se ve reflejado en los ODS 7 “Energía Asequible y No Contaminante” y 13 “Acción por el Clima”. Al adoptar la Agenda 2030, la Europa se marcó como objetivo ser el primer continente climáticamente neutro en el año 2050 (Dr. Ing. Johan Breukelaar, 2019).

Añadido al problema ambiental que representan las emisiones de gases de efecto invernadero se encuentra el impacto que algunos de estos contaminantes causan sobre la salud humana. En particular, las emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x), de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM) pueden ser inhaladas y provocar problemas de salud graves debido a su capacidad para disminuir las funciones cardiovasculares y cardiopulmonares, aumentando la tasa de cáncer de pulmón y enfermedades respiratorias (Durán-Grados et al., 2022; H. Lee et al., 2020; Murray et al., 2020). El desarrollo del conocimiento y la tecnología han permitido perfeccionar soluciones para el control de estos contaminantes, limitando su dispersión mediante chimeneas y aplicando métodos de lavado de gases y reducción catalítica (World Bank Group, 1998).

2. APORTACIONES DEL SECTOR MARÍTIMO A LA POLUCIÓN AÉREA

El comercio internacional depende del transporte marítimo para mover el 80% de las mercancías (UNCTAD, 2023). A pesar de ser el medio de transporte más masivo, la contribución actual a las emisiones totales de CO₂ es únicamente del 2,89% (International

Maritime Organization (IMO), 2021). El problema relacionado con la contaminación aérea producida por los buques está relacionado con el incremento de su uso a medio y largo plazo, así como con la descarbonización del resto de sectores. De acuerdo con las proyecciones de la OCDE, el volumen de carga transportado por vía marítima podría llegar a triplicarse en el año 2050 (OECD/ITF, 2018). De suceder esto, el porcentaje de emisiones asociado al sector marítimo se incrementaría notablemente.

La Organización Marítima Internacional (OMI), agencia especializada de Naciones Unidas responsable de la seguridad y la prevención de la contaminación del mar por los buques, comenzó a trabajar en la descarbonización del sector marítimo en el año 1997, al publicar la Resolución 8 (International Maritime Organization (IMO), 1997). Este texto inicial indicaba que, aunque la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (por sus siglas en inglés, UNFCCC) reconocía el CO₂ como gas de efecto invernadero (United Nations, 1992), el Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (por sus siglas en inglés, MARPOL) no abordó inicialmente las emisiones de CO₂ del transporte marítimo, e invitaba a la OMI y a su Comité de Protección del Medio Marino a estudiar la puesta en marcha de estrategias para la reducción de las emisiones de CO₂. A raíz de esta Resolución, la OMI redactó un informe en el año 2000 en el que concluía que, teniendo en cuenta los datos de 1996, las emisiones del transporte marítimo representaban un 1,8% del total mundial (Henningsen et al., 2000). En 2003, la OMI adoptó la Resolución A.963(23), la cual instaba al Comité de Protección del Medio Marino a identificar y desarrollar los mecanismos necesarios para lograr la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (International Maritime Organization (IMO), 2003). En los años 2009 y 2014 se sucedieron las reevaluaciones del estudio sobre los gases de efecto invernadero generados por el transporte marítimo, pasando del 1,8% del primer estudio al 2,7 y 2,8% respectivamente (Buhaug et al., 2009; T. W. P. Smith et al., 2014). En 2019 se completó el Cuarto Estudio sobre Gases de Efecto Invernadero, el más reciente hasta la fecha, el cual utiliza datos de 2018 y concluye que las emisiones de CO₂ de los buques ascendieron al 2,89% (International Maritime Organization (IMO), 2021a). Como se puede observar, el porcentaje que representan las emisiones derivadas del transporte marítimo ha ido en continuo crecimiento durante las últimas dos décadas.

Los cuatro Estudios sobre Gases de Efecto Invernadero que la Organización Marítima Internacional ha publicado hasta la fecha no sólo estudian los efectos del dióxido de carbono, sino que también analizan las emisiones de: metano, óxido nitroso, monóxido de carbono, material particulado, carbono negro, compuestos orgánicos volátiles, NO_x y SO_x. Cada uno de estos contaminantes estudiados produce un daño diferente. Algunos de ellos, como el carbono negro, producen un efecto medioambiental limitado a una zona geográfica concreta: debido a la combustión incompleta de combustibles residuales en la zona del Ártico, los buques emiten partículas de carbono negro que se acaban depositando en el

hielo. Esto acelera el derretimiento de nieve y hielo, exponiendo áreas más oscuras de tierra y agua, zonas que absorben más calor del sol y reducen drásticamente la capacidad reflectante de los casquetes polares (Qi et al., 2024). En otros casos, como los SO_x, contribuyen a la acidificación de los océanos y resultan perjudiciales para la salud de las personas al facilitar la formación de material particulado (PM_{2.5}) (Bernardo et al., 2023; Finland, 2016). El caso particular de los SO_x es reseñable; en enero de 2020 la Organización Marítima Internacional rebajó el límite de azufre en el combustible del 3,5 al 0,5% (International Maritime Organization (IMO), 2020). Como resultado, las emisiones de SO_x a la atmósfera se han reducido en un 10% a nivel global. Los efectos en el ambiente de esta regulación han sido inmediatos, pero en cierta parte contraproducentes ya que las partículas de azufre contenidas en las emisiones de los buques producían un efecto de enfriamiento que contrarrestaba parte del calentamiento provocado por los gases de efecto invernadero. La reducción del contenido de azufre en el combustible de los buques ha debilitado el enmascaramiento, favoreciendo así el incremento en la temperatura (Sofiev et al., 2018; T. Yuan et al., 2022). No obstante, los efectos de la reducción de la concentración de SO_x presenta grandes beneficios para la salud de las personas y se ha calculado que la reducción del 90% de las emisiones derivadas del transporte marítimo provocaría un aumento de temperatura de 0,05°C (Fuglestvedt et al., 2009).

Los esfuerzos para el control de la polución aérea de los buques no sólo deben estar orientados a las nuevas construcciones. De acuerdo con el informe *Review of Maritime Transport 2023* de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo, la edad media de la flota mercante mundial es de 21,9 años (UNCTAD, 2023). Este estudio, basado en 105 493 buques, pone de manifiesto la necesidad de establecer medidas para la descarbonización de la flota en servicio (Czernański et al., 2022; Kharroubi & Söğüt, 2020). La disminución de las emisiones de los buques en servicio se encuentra con barreras: el espacio disponible a bordo para la instalación de nuevos equipos suele ser escaso, y gran cantidad de los buques que más contaminan están al final de su vida útil, lo que podría provocar que dichas mejoras no llegasen a ser amortizadas. Debido a estos y otros inconvenientes, es probable que no todos los armadores sean proactivos en la reforma de sus buques, y de ahí la necesidad de legislar (Ghaforian Masodzadeh et al., 2022).

El objetivo de limitar las emisiones aéreas del transporte marítimo puede conseguirse fundamentalmente de dos maneras: reemplazando los combustibles fósiles por alternativas limpias o incrementando la eficiencia energética de las instalaciones. Ambas medidas son compatibles entre sí y podrían ser combinadas para lograr un nivel de emisiones cero, al menos de manera neta (Baresic et al., 2023).

El uso de combustibles alternativos es uno de los campos con mayor potencial en términos de reducción de emisiones y la Organización Marítima Internacional lo reconoce como la

primera estrategia en la lucha contra las emisiones de gases de efecto invernadero. El objetivo que se persigue es poder seguir utilizando los equipos de propulsión y generación eléctrica ya instalados, pero con emisiones cero o neutras. En la actualidad existen varias alternativas a los combustibles fósiles entre las que se encuentran: gas natural, metanol, amoníaco, hidrógeno y biocombustibles de origen vegetal, cada una de ellas con un distinto nivel de madurez (Foretich et al., 2021; International Maritime Organization (IMO), 2023b). Esta variedad de alternativas puede resultar una ventaja, pero también un inconveniente: la configuración de los motores marinos y sus equipos auxiliares para utilizar cada uno de los combustibles mencionados es diferente, y los puertos deberán ser capaces de almacenar y suministrar al menos aquellas alternativas que sean más demandadas. Con el objetivo de conocer de manera realista las emisiones asociadas al transporte marítimo, la OMI está trabajando en el análisis del ciclo de vida de los distintos combustibles propuestos (International Maritime Organization (IMO), 2023b; Mærsk Mc-Kinney Møller Center for Zero Carbon Shipping, 2023).

La línea relacionada con la eficiencia energética ha sido objeto de estudio y aplicación por parte de la OMI desde el año 2011, cuando se estableció la Resolución MEPC.212(63) por la que se establecían las directrices sobre el método de cálculo del índice de eficiencia energética de proyecto (EEDI) obtenido para buques nuevos (International Maritime Organization (IMO), 2012). Esta resolución, que fue adoptada el 2 de marzo de 2012 y es de aplicación para buques con un arqueo bruto de 400 GT o mayor, es una clasificación de eficiencia energética dedicada a buques de nueva construcción. Al aplicarla, se calcula una puntuación de rendimiento basada en características técnicas como la velocidad alcanzable, la potencia del motor, el consumo de combustible y el tipo de buque. El resultado de este cálculo, conocido como EEDI obtenido, debe ser menor que el establecido para esa tipología de buque concreta. Como complemento al indicador EEDI, en 2016 la OMI adoptó la Resolución MEPC.282(70) que indica las directrices para la elaboración de un plan de gestión de la eficiencia energética del buque (por sus siglas en inglés, SEEMP) (International Maritime Organization (IMO), 2016). El SEEMP fue concebido para establecer un mecanismo con el que los armadores mejoren la eficiencia energética de sus buques, intentando que al fomentar la reducción en el consumo de energía se reduzcan las emisiones de gases, especialmente CO₂. Posteriormente, en 2018, la OMI publicó su “Estrategia inicial sobre los gases de efecto invernadero” (International Maritime Organization (IMO), 2018a). Esta fue diseñada para actuar en consonancia con la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (por sus siglas en inglés, UNCLOS), el Acuerdo de París y los ODS pertinentes de la Agenda 2030. Este documento introdujo medidas a corto, medio y largo plazo, además de identificar barreras en su aplicación. Cinco años más tarde, y con el conocimiento adquirido, la OMI adoptó el índice de eficiencia energética aplicable a los buques existentes (EEXI), un índice de carácter técnico que viene a complementar los

requisitos del EEDI en la flota ya en operación (International Maritime Organization (IMO), 2021b, 2021c; S.-S. Lee, 2024). Además, introdujo el indicador de intensidad de carbono (CII) que clasifica los buques en función del nivel de emisiones de CO₂ anuales. La culminación de las medidas de eficiencia energética vino dada con la implantación de la “Estrategia de 2023 sobre la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los buques” más sólida, precisa y directa que la inicial, ya que la consecución de los objetivos a corto plazo de la estrategia inicial condujo a que los nuevos objetivos fueran más precisos. Una de las grandes ventajas que plantea la reducción de emisiones mediante el incremento de eficiencia energética es que, en términos generales, las tecnologías necesarias están ya disponibles para ser implementadas. Y en su mayor parte no dependen de elementos externos al buque, como sí lo hacen los combustibles alternativos. Por estas razones, se estima que hasta un 43% del esfuerzo de descarbonización del sector marítimo podría venir de la mano del incremento de la eficiencia energética (CE Delft, 2019).

3. DESCARBONIZANDO EL SECTOR MARÍTIMO MEDIANTE EL INCREMENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

Las principales medidas establecidas por la Organización Marítima Internacional para fomentar la eficiencia energética de los buques responden a los índices de eficiencia energética para buques nuevos (EEDI) y en servicio (EEXI), que son de carácter técnico, se calculan una única vez y son válidos para toda su vida útil, a excepción de que se ejecute una reforma mayor. Desde el punto de vista operacional la OMI diseñó el indicador de intensidad de carbono (CII) que cada buque debe calcular de manera anual y varía en función del consumo de combustible y la distancia recorrida durante ese año. Debido a la metodología aplicada a cada una de las medidas, dos buques con el mismo EEDI podrían emitir una cantidad de gases contaminantes muy diferentes en función de su perfil de operación. En cambio, el indicador CII resulta mucho más interesante ya que ofrece una perspectiva realista de las emisiones de gases de efecto invernadero que cada buque emite anualmente, relacionando el consumo del buque con las millas navegadas durante cada año de calendario.

La obligación de reportar el indicador de intensidad de carbono entró en vigor en el año 2023 por lo que la OMI considera el período actual como fase inicial en la que se recoge la experiencia con el objetivo de realizar la revisión de los términos que sean necesarios en el año 2026. Se plantea de esta manera para poder recoger datos sobre la aplicación práctica del concepto teórico en las diferentes situaciones de cada buque y cada naviera particular. La adopción de la metodología de cálculo del CII no fue fácil de determinar puesto que la OMI buscaba un sistema que fuera preciso, pero a la vez lo suficientemente flexible para poder ser

aplicable a cualquier tipo de buque. Esto dio como resultado cuatro tipos de factores que afectan al cálculo de indicador: factores que puede controlar el operador (limpieza del casco del buque, mantenimiento de máquinas), variables que escapan del control de operador (climatología, navegación en áreas excepcionales – como zonas de piratería –), restricciones técnicas (calidad del combustible, términos contractuales con el cliente) y aquellos asociados directamente a la fórmula de cálculo utilizada o la incertidumbre de los datos de combustible y distancia recogidos (Ghaforian Masodzadeh et al., 2024). Durante el último período de sesiones del Comité de Protección del Medio Marino (81 MEPC), celebrado entre los días 18 y 22 de marzo de 2024, varios de los países miembros y organizaciones reconocidas plantearon observaciones sobre la aplicación. Entre ellas destacan las efectuadas por la sociedad de clasificación RINA, la organización internacional de la industria del ferry (INTERFERRY) y la asociación internacional de armadores de carga seca (INTERCARGO). En primer lugar, RINA expuso la problemática asociada a los tiempos en los que el buque se encuentra en astillero. Independientemente de que la reparación se realiza a flote o en seco, el buque está consumiendo energía para sus servicios auxiliares y acomodación mientras que no cubre millas, lo que supone un incremento en su CII. Como ejemplo de este inconveniente, la sociedad de clasificación mencionaba que aquel buque que obtiene un CII por encima del permitido y se debe someter a una reforma para aumentar su eficiencia energética se verá perjudicado al año siguiente debido al tiempo requerido en astillero para la adaptación (International Maritime Organization (IMO), 2024a). Por su parte, INTERFERRY relató la desventaja de la fórmula cuando es aplicada a buques de alta frecuencia, que realizan viajes de corta duración y pasan un gran porcentaje del tiempo en maniobras de entrada y salida a puerto, donde los consumos son elevados y las millas recorridas prácticamente nulas (International Maritime Organization (IMO), 2024b). Este hecho penaliza al indicador agregado de flotas como la española, donde el 22% son buques Ro-Pax (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible., 2023). La asociación internacional de armadores de carga seca realizó un amplio estudio en colaboración con cinco sociedades de clasificación en donde se evaluó el impacto de los viajes cortos, los tiempos de espera en puerto y el nivel de carga de los buques (International Maritime Organization (IMO), 2024h, 2024i, 2024j, 2024k). Este último ha venido siendo objeto de discusión durante largo tiempo ya que, durante la elaboración de la fórmula del CII se propusieron variantes que únicamente consideraban las millas navegadas de los viajes en carga y la masa real de carga transportada. Debido a la sensibilidad de los datos, la OMI decidió no utilizar dichas fórmulas y proponer un indicador que tiene en cuenta el arqueo bruto del buque y las millas totales navegadas. Aunque esto salvaguarda la privacidad de las empresas, perjudica a aquellos buques que realizan una parte significativa de sus viajes en lastre, o a media carga (Ghaforian Masodzadeh et al., 2024).

Aunque con una importancia menor, debido al reducido número de buques propulsados por hidrógeno en la actualidad, pero interesante fue la aportación de la ONG con estatus

consultivo Environmental Defense Fund (EDF). En su intervención destacó el problema que plantean las emisiones de hidrógeno a la atmósfera ya que alrededor del 30% de las mismas reaccionan con el radical hidroxilo presente de manera natural. Esta reacción aumenta la cantidad de gases de efecto invernadero como el metano, el ozono y el vapor de agua en la parte superior de la atmósfera (International Maritime Organization (IMO), 2024f; Paulot et al., 2021). Pasar por alto esta observación podría hacer que el uso de un combustible que en principio se creía no contaminante acabe incrementando el calentamiento global.

Adicionalmente, se realizaron observaciones sobre otras carencias:

- Los datos para el cálculo del CII deben ser recogidos por un sistema preciso y no manipulable, para evitar el fraude (International Maritime Organization (IMO), 2024d).
- Como parte del proceso de verificación se podrían implementar sistemas de inteligencia artificial que detectasen las posibles anomalías en la base de datos (International Maritime Organization (IMO), 2024d). Por ejemplo, se podrían implementar optimizadores permitan la comparación entre el consumo de combustible notificado y el consumo de combustible previsto para un determinado tipo de buque y su perfil de operación en una ruta determinada.
- Las líneas de referencia asignadas para cada buque en las directrices G1 para los indicadores de la intensidad de carbono operacional y los métodos de cálculo, y G5 para factores de corrección y ajustes de viaje para los cálculos del CII no son iguales. Esto viene dado porque ambas directrices utilizan diferentes definiciones para la capacidad del buque. Esta distinción, en particular para categorías específicas como los graneleros, metaneros y los buques de carga rodada, crea un trato desigual. Para estas tres categorías, un buque que no se beneficie de un factor de corrección estará sujeto a un valor de capacidad diferente en comparación con un buque del mismo tipo que sí pueda acogerse a tales beneficios (International Maritime Organization (IMO), 2024e).
- El coste de no cumplir con el indicador resulta difícil de cuantificar (International Maritime Organization (IMO), 2024a). Esto tiene un efecto negativo a la hora de proponer un modelo de negocio en el que se tengan en cuenta las emisiones de CO₂.
- Se debe definir cómo se reportan los biocombustibles, si únicamente la fracción de combustible fósil o en su totalidad (International Maritime Organization (IMO) et al., 2024).
- La cantidad de CO₂ equivalente derivada de las emisiones de metano y óxido nitroso deberían tenerse en cuenta, a semejanza de la normativa europea (Reglamento (UE) 2023/957). La inclusión de este CO₂ equivalente reforzaría los objetivos de los índices de eficiencia propuestos por la OMI pero conllevaría una revisión de las líneas de referencia utilizadas (International Maritime Organization (IMO), 2024g).

Una vez que el cálculo de CII haya sido perfeccionado será la métrica que defina el grado de eficiencia energética operacional de cada buque. La OMI destaca esto y separa los enfoques de eficiencia energética y uso de nuevos combustibles. Aunque por las dos vías son efectivas para llegar a descarbonizar el sector marítimo, la OMI está enfocando su normativa para que no pueda existir un buque el cual no emita polución aérea debido al uso de combustibles limpios, pero sea muy intensivo energéticamente (International Maritime Organization (IMO), 2024c). Para fomentar el aumento de la eficiencia energética de los buques se aprobó en 2021 la Circular MEPC.1/Circ.896 “Orientaciones para el tratamiento de las tecnologías innovadoras de eficiencia energética en el cálculo y la verificación del EEDI y EEXI obtenidos” que cataloga cuatro tipos de tecnologías consideradas como aptas para mejorar los índices de eficiencia energética de los buques, e indirectamente el indicador de intensidad de carbono: lubricación por aire (que disminuye el roce del casco con el agua y por tanto la resistencia al avance), propulsión asistida por el viento, generación eléctrica mediante placas fotovoltaicas, y recuperación de calor residual. El primer sistema necesita de grandes compresores de aire que generen el caudal suficiente para crear el colchón de burbujas necesario para reducir la resistencia al avance del buque. Debido a la alta demanda energética de los compresores, la recuperación neta estará limitada a la diferencia entre la resistencia al avance eliminada y el consumo eléctrico de los sistemas añadidos (Park & Lee, 2018; Pavlov et al., 2020). El uso de placas fotovoltaicas en el buque se puede ver restringido en cierta manera debido a la escasez de espacio disponible. Además, la irradiación solar en cada punto del planeta es diferente por lo que en función de la ruta realizada un mismo buque podría tener niveles de recuperación energética sustancialmente diferentes. Como referencia, la Circular MEPC.1/Circ.896 establece una irradiación solar media en las principales rutas marítimas de 200 W/m², lejos de los 1000 W/m² que marcan estándares internacionales como la norma IEC 61215 (International Electrotechnical Commission, 2021). Los sistemas de eficiencia energética mediante recuperación de calor residual pueden ser los más interesantes a la hora de instalar en un buque ya que varios de los equipos habituales en la sala de máquinas disipan calor cuando están en operación. Por ejemplo, un motor diésel de cuatro tiempos semirrápido, habitual en multitud de buques, puede llegar a disipar hasta un 34,2% de la energía contenida en el combustible entre los circuitos de agua, aceite y el calor radiado al exterior (L.A. Díaz-Secades et al., 2022). Parte de este calor ya es reaprovechado en equipos clásicos en el sector, como los sistemas de generación de vapor y desalación, pero una gran cantidad de esta energía térmica se desperdicia en calentar el ambiente. Este efecto resulta incluso contraproducente si se observa desde la perspectiva del factor humano y la seguridad laboral (Costa et al., 2020). Añadido a esto, las tecnologías de recuperación de calor son lo suficientemente versátiles para adaptarse a las temperaturas disponibles, lo que permite maximizar la recuperación energética. La combinación de varios de estos sistemas, cada uno optimizado para un grado de temperatura diferente, junto con un optimizador basado en inteligencia artificial que

varíe el punto de operación de cada tecnología de recuperación en función de la carga del motor ha conseguido reducir hasta un 15,04% de consumo de combustible, que se traduce directamente en reducción de las emisiones de CO₂ (Luis Alfonso Díaz-Secades, González, Rivera, et al., 2023).

Dentro de los sistemas de recuperación de calor los equipos más utilizados son los ciclos termodinámicos, en particular el ciclo Rankine de vapor y su versión orgánica, que permite al ciclo adaptar su funcionamiento en función de la temperatura de la fuente de calor. En este tipo de ciclos la expansión del fluido mueve una turbina que arrastra un generador eléctrico, produciendo energía de alta calidad y plenamente utilizable a bordo (Luis Alfonso Díaz-Secades, González, & Rivera, 2023). El astillero coreano Mitsubishi Heavy Industries ya ha instalado ciclos Rankine orgánicos en buques de la naviera Maersk siendo estos capaces de recuperar hasta 125 kW desde una fuente a baja temperatura, entre 80 y 95°C (Sellers, 2017). Los ciclos de tipo Brayton no son tan comúnmente utilizados debido a que están diseñados para fuentes de calor de alta temperatura aunque su variante orgánica, en la que habitualmente emplea CO₂ en lugar de aire, sí que ha sido ampliamente estudiada (Feng et al., 2020; Ouyang, Su, Yang, et al., 2020; Wang et al., 2022). Aunque en menor medida, también se han realizado investigaciones sobre la viabilidad de implantar sistemas de desalación por congelación (Su et al., 2020; H. Yuan et al., 2019), y recuperación de energía fría, muy interesante para todos aquellos buques que consumen gas natural. Durante el proceso de vaporización el gas absorbe calor por lo que puede ser utilizado para sustituir el trabajo aportado en los ciclos de refrigeración por compresión mecánica presentes a bordo (Almeida Alcalá et al., 2023; Ouyang, Su, Wang, et al., 2020).

Un campo que ha recibido poca atención y puede resultar prometedor es la recuperación del calor residual radiado por los equipos. A mayores del calor recogido por los fluidos refrigerantes como pueden ser el agua, los fluidos orgánicos o el propio aceite lubricante, las superficies metálicas de los equipos irradian energía térmica al ambiente que acaba siendo desperdiciada. Las razones por las que no se han dedicado los mismos esfuerzos a avanzar en este terreno son notables: es habitual que la energía térmica radiada sea de baja temperatura, lo que hace que el nivel de entropía sea alto, dejando poca exergía recuperable (L. A. Díaz-Secades et al., 2022). En segundo lugar, las estrategias tradicionales en las que se fuerza la circulación de un fluido que absorbe el calor mediante conducción y convección no resultan viables en las superficies de equipos que, en su mayoría, montan componentes electrónicos y deben estar secos. Afortunadamente, la aplicación tecnológica del efecto Seebeck puede salvar estas barreras. El efecto Seebeck produce que, al aplicar calor a un par de metales disimilares en contacto, se genere una diferencia de tensión en sus bornes (Goldsmid, 2016). Este fenómeno ha sido ampliamente estudiado y a día de hoy se comercializan módulos termoeléctricos que pueden generar más de cuatro vatios con sólo 120°C de diferencia entre sus caras (Marlow Industries, 2015). Con la configuración

correcta dichos módulos pueden ser capaces de recargar baterías o alimentar directamente los distintos servicios a bordo (Luis Alfonso Díaz-Secades, 2023). Otras ventajas asociadas a los generadores termoeléctricos que no están presentes en otros sistemas de recuperación de calor es su larga vida útil, su facilidad de mantenimiento y la ausencia de ruidos y vibraciones (Champier, 2017; Saha et al., 2023).

4. SINERGIAS ENTRE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

El sonido generado por los equipos de propulsión y auxiliares del buque es un fenómeno creado por la transmisión de ondas sonoras. Estas, especialmente en los rangos de frecuencia acústicos, viajan con menos atenuación a través del agua que a través del aire. Por esta razón, el ruido submarino generado por los buques en sus operaciones de tránsito resulta dañino para el medio marino, pudiendo tener efectos perniciosos en la fauna como son: daños físicos, desde la pérdida de audición hasta la muerte; entorpecimiento de las comunicaciones; reducción de la búsqueda de alimento, especialmente cuando los animales utilizan el sonido para localizar a sus presas; aumento de los niveles de estrés; y modificación del comportamiento, incluida la evitación de zonas muy ruidosas (International Maritime Organization (IMO), 2018b, 2018c).

Los focos de ruido habituales en el buque son: ruido de flujo (el paso de un buque por el agua crea campos de presión que, a su vez, son la fuente de ondas de diversos tipos, incluidas las ondas sonoras), ruido de maquinaria (procedente de todos los equipos rotativos y alternativos que en funcionamiento, e incluso de equipos estáticos como transformadores y convertidores de frecuencia) y ruido del propulsor (el paso de las palas de la hélice por el agua crea ruido de flujo, y a medida que cada pala se desplaza por un campo de presión fluctuante, emite impulsos de energía sonora. Además, el fenómeno de la cavitación genera un ruido de gran intensidad). En la actualidad, los niveles de ruido submarino radiado no están regulados a escala internacional, aunque algunas navieras exigen que sus buques cumplan determinados niveles de ruido para satisfacer requisitos operativos. Con la reciente publicación en de la circular MEPC.1/Circ.906 “Directrices revisadas para reducir el ruido submarino radiado debido al transporte marítimo con el fin de abordar sus efectos adversos en la fauna marina” (International Maritime Organization (IMO), 2023a), las sociedades de clasificación comenzarán a certificar los buques en base a varios niveles de rigurosidad (Hannay et al., 2023).

En el año 2007, Southall y Scholik-Scholmer, de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (por sus siglas en inglés, NOAA), presentaron un informe en el que mencionaban las posibles sinergias entre las tecnologías de eficiencia energética y

reducción de ruido radiado por el buque, apuntando a que una misma tecnología podría cumplir ambos cometidos (Southall & Scholik-Schlomer, 2008). Posteriormente, el astillero Vard en conjunto con el gobierno de Canadá continuaron el trabajo elaborando informes sobre ruido submarino radiado por los buques y medidas de mitigación de gases de efecto invernadero (Vard Marine Inc., 2019, 2021). En un informe posterior, elaborado en 2023, Vard Marine examinó un centenar de sistemas de eficiencia energética y su potencial para mitigar el ruido radiado al entorno entre los que destacan (Vard Marine Inc., 2023):

- Limpieza del casco y el propulsor: capaz de incrementar hasta un 5% la eficiencia energética y disminuir hasta 5 dB el ruido emitido al exterior. Por el contrario, incrementa las tareas de mantenimiento del buque, especialmente porque la solución resulta mucho más efectiva si se aplica en astillero (Burnham et al., 2021; Canadian Science Advisory Secretariat, 2017; Glosten, 2022; T. Smith, 2020).
- Sistemas de lubricación por aire: con tres configuraciones, el colchón de aire clásico, una versión conocida como *Masker* dedicada a mitigar el ruido de la maquinaria hacia el exterior (con propósitos militares), y el sistema de cavidades parciales que inyecta el aire en recesos creados a propósito en el fondo del buque y está orientado a navegaciones en aguas interiores (Kim & Steen, 2023). En general este sistema consigue incrementar la eficiencia energética entre un 4 y un 12%, algo menos en el caso del *Masker* debido a la mayor cantidad de recursos que consume al tener que estar funcionando también durante las estancias en puerto (Kawabuchi et al., 2011; U.S. Surface Officer Warfare School, n.d.). La reducción de ruido puede ser superior a los 10 dB.
- Utilización de convertidores de frecuencia: gran parte de los equipos auxiliares del buque son bombas y ventiladores centrífugos. Estos equipos han sido clásicamente conectados directamente a la red eléctrica y la regulación de caudal realizada mediante válvulas o compuertas. Conocidas las leyes de afinidad para bombas y ventiladores, se sabe que la potencia eléctrica absorbida por el motor es proporcional al cubo de la velocidad del eje. Hoy en día, los convertidores de frecuencia permiten regular ampliamente la velocidad del motor eléctrico de manera que la regulación de caudal conlleva un ahorro energético importante (ABB, 2021). La disminución en el ruido submarino emitido por el buque puede llegar a los 5 dB.
- Sistemas de recuperación de calor: reaprovechando la misma energía térmica para otros usos o transformándola en energía eléctrica. El incremento de eficiencia energética puede alcanzar el 8% (Campora et al., 2023; Luis Alfonso Díaz-Secades, González, Rivera, et al., 2023; Vakili et al., 2021). En este caso el estudio de Vard Marine declara que no existe una mejora en cuanto al ruido emitido al exterior. En este aspecto es donde tecnologías emergentes como los generadores termoeléctricos podrían aportar: si se instalan en el bloque de motores dedicados a la generación eléctrica los módulos

facilitarán que dicho motor pueda reducir su carga, reduciendo el ruido emitido. Además, al ser una técnica silenciosa, no produciría un incremento en la presión acústica.

El coste económico de implementar estas tecnologías puede representar una barrera importante, en especial para aquellos buques que estén próximos al final de su vida útil. La limpieza de casco y propulsor no tiene un coste fijo ya que dependerá del tamaño del buque y su nivel de suciedad. Los armadores podrían hacer coincidir los períodos de mantenimientos mayores del buque para realizar esta tarea, minimizando así el coste de los trabajos y el tiempo de inactividad. Por su parte, los sistemas de lubricación de aire tienen un período de amortización que ronda los cinco años, aunque podría variar ya que está basado en los sistemas *Masker* instalados en el sector naval. La instalación de convertidores de frecuencia resulta una de las estrategias más convenientes ya que no es necesario realizar el cambio de todos los equipos a la vez, se pueden ir reemplazando arrancadores de forma independiente, y el precio ronda los 250 euros por kilovatio. Los sistemas de recuperación de calor pueden ser muy variados y aquellos que utilizan fluidos orgánicos ven aumentados su precio en función del precio específico del fluido elegido y la cantidad necesaria.

En el caso concreto de los generadores termoeléctricos se pueden obtener instalaciones con un precio de entre 5800 y 7500 euros por kilovatio. En este momento puede ser uno de los sistemas que requiera una mayor inversión inicial pero que se podría compensar debido a la práctica ausencia de mantenimiento que requieren y su larga vida útil. Añadido a esto, el nivel de madurez tecnológica de este sistema es menor que el de otras tecnologías de recuperación como puede ser la desalación por evaporación por lo que su precio debería descender a medida que evoluciona (Castañeda et al., 2023; Saha et al., 2023).

5. CONCLUSIONES

Dentro del panorama global, el sector marítimo representa la cinta transportadora que conecta diversos continentes, permitiendo el comercio de mercancías internacional. Aun siendo de gran necesidad, no se debe obviar el hecho de que los buques mercantes contribuyen en casi un 3% a las emisiones de CO₂, además de emitir otra serie de gases nocivos tanto para la salud del planeta como de las personas. La Organización Marítima Internacional es consciente del problema y desde hace más de dos décadas ha trabajado en la mitigación de dichas emisiones. Una alternativa prometedora es el uso de combustibles alternativos, provenientes de fuentes de energía renovable que no emitan gases tóxicos. Pero el desarrollo tecnológico de dichos combustibles no está aún optimizado y su nivel de penetración en el mercado es relativamente escaso. Sin embargo, la aplicación de métodos y técnicas de eficiencia energética está disponible actualmente y no necesita reemplazar grandes equipos para poder obtener resultados. Entre las diversas tecnologías de

reaprovechamiento energético se encuentra la recuperación de calor residual, muy apropiada para las instalaciones marinas debido al uso intensivo de máquinas térmicas en los buques.

Los sistemas de recuperación de calor residual son muy variados y extremadamente flexibles. A bordo es habitual utilizar el calor residual recogido por el agua de refrigeración de los motores para la desalación de agua de mar. Y detrás del concepto de ciclo Rankine se pueden conformar máquinas que recuperen energía térmica de diversas fuentes. Adaptando el fluido de trabajo, agua o fluidos orgánicos, se maximiza la recuperación de energía a diferentes temperaturas. Conocidas estas tecnologías, y sabido también que la aplicación de algunas de ellas puede mitigar el ruido radiado al exterior de manera que se minimice aún más el impacto del buque en el medio marino, el siguiente paso es elegir de manera consciente aquellas tecnologías que sean capaces de recuperar energía y mitigar el ruido de una misma vez. En este sentido, los generadores termoeléctricos se postulan como una opción interesante y que requiere una mayor atención y estudio.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB. (2021). *Energy efficiency handbook - Toward zero emission ship operations*. library.e.abb.com
- ALMEIDA ALCALÁ, E. C., CENTENO IDIÁÑEZ, Y., DEVESA GUTIÉRREZ, S., NOSTI SÁNCHEZ, P., ORTEGA GARCÍA, J., RUIZ SÁNCHEZ, C., & DÍAZ-SECADES, L. A. (2023). Highly efficient 2-Stroke Marine Engine analysis coupled with a cold Energy Recovery System. *Development of Social and Engineering Innovation in Maritime Education and Training to Ensure Shipping Safety, March*.
- BAREŠIĆ, D., PRAKASH, V., STEWART, J., REHMATULLA, N., & SMITH, T. (2023). *Climate Action in Shipping: Progress towards Shipping's 2030 Breakthrough*. www.globalmaritimeforum.org/getting-to-zero-coalition
- BERNARDO, F., GARCIA, P., & RODRIGUES, A. (2023). Air Quality at Ponta Delgada City (Azores) Is Unaffected so Far by Growing Cruise Ship Transit in Recent Years. *Atmosphere*, 14(1), 188. <https://doi.org/10.3390/atmos14010188>
- BUHAUG, Ø., CORBETT, J. J., ENDRESEN, O., EYRING, V., FABER, J., HANAYAMA, S., LEE, D. S., LINDSTAD, H., MARKOWSKA, A. Z., MJELDE, A., NELISSEN, D., NILSEN, J., C. PÅLSSON, J. J., & WINEBRAKE, W. WU, K. Y. (2009). *Second IMO GHG Study*.
- BURNHAM, R. E., VAGLE, S., O'NEILL, C., & TROUNCE, K. (2021). The Efficacy of Management Measures to Reduce Vessel Noise in Critical Habitat of Southern Resident

- Killer Whales in the Salish Sea. *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.664691>
- CALVIN, K., DASGUPTA, D., KRINNER, G., MUKHERJI, A., THORNE, P. W., TRISOS, C., ROMERO, J., ALDUNCE, P., BARRETT, K., BLANCO, G., CHEUNG, W. W. L., CONNORS, S., DENTON, F., DIONGUE-NIANG, A., DODMAN, D., GARSCHAGEN, M., GEDEN, O., HAYWARD, B., JONES, C., ... HA, M. (2023). *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... C. Péan (eds.)). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
 - CAMPORA, U., COPPOLA, T., MICOLI, L., MOCERINO, L., & RUGGIERO, V. (2023). Techno-Economic Comparison of Dual-fuel Marine Engine Waste Energy Recovery Systems. *Journal of Marine Science and Application*, 22(4), 809–822. <https://doi.org/10.1007/s11804-023-00368-0>
 - CANADIAN SCIENCE ADVISORY SECRETARIAT. (2017). *Evaluation of the scientific evidence to inform the probability of effectiveness of mitigation measures in reducing shipping-related noise levels received by southern resident killer whales.*
 - CASTAÑEDA, M., AMELL, A. A., CORREA, M. A., AGUILAR, C. E., & COLORADO, H. A. (2023). Thermoelectric Generator Using Low-Cost Thermoelectric Modules for Low-Temperature Waste Heat Recovery. *Sustainability*, 15(4), 3681. <https://doi.org/10.3390/su15043681>
 - CE DELFT. (2019). *Study on methods and considerations for the determination of greenhouse gas emission reduction targets for international shipping.*
 - CHAMPIER, D. (2017). Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management*, 140, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070>
 - COSTA, Á. M., BOUZÓN, R., OROSA, J. A., & DE LA CAMPA, R. (2020). Fatigue due to on board work conditions in merchant vessels. *Journal of Maritime Research*, 17(3), 37–46. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85117296246&partnerID=40&md5=bec70e78eb7c79d41de1da2c44c48664>
 - CZERMAŃSKI, E., ONISZCZUK-JASTRZĄBEK, A., SPANGENBERG, E. F., KOZŁOWSKI, Ł., ADAMOWICZ, M., JANKIEWICZ, J., & CIRELLA, G. T. (2022). Implementation of the Energy Efficiency Existing Ship Index: An important but costly step towards ocean protection. *Marine Policy*, 145, 105259. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105259>

- DÍAZ-SECADES, L. A., GONZÁLEZ, R., & RIVERA, N. (2022). Waste heat recovery from marine main medium speed engine block. Energy, exergy, economic and environmental (4E) assessment – Case study. *Ocean Engineering*, 264(April), 112493. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112493>
- DÍAZ-SECADES, LUIS ALFONSO. (2023). *Reaprovechamiento energético de motor diésel marino mediante generadores termoeléctricos*. Universidad de Oviedo.
- DÍAZ-SECADES, LUIS ALFONSO, GONZÁLEZ, R., & RIVERA, N. (2023). Waste heat recovery from marine engines and their limiting factors: Bibliometric analysis and further systematic review. *Cleaner Energy Systems*, 6, 100083. <https://doi.org/10.1016/j.cles.2023.100083>
- DÍAZ-SECADES, LUIS ALFONSO, GONZÁLEZ, R., RIVERA, N., MONTAÑÉS, E., & QUEVEDO, J. R. (2023). Waste heat recovery system for marine engines optimized through a preference learning rank function embedded into a Bayesian optimizer. *Ocean Engineering*, 281, 114747. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114747>
- DR. ING. JOHAN BREUKELAAR. (2019). The European Green Deal. *European Commission*, 53(9), 24. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN>
- DURÁN-GRADOS, V., RODRÍGUEZ-MORENO, R., CALDERAY-CAYETANO, F., AMADO-SÁNCHEZ, Y., PÁJARO-VELÁZQUEZ, E., NUNES, R. A. O. O., ALVIM-FERRAZ, M. C. M. M., SOUSA, S. I. V. V., & MORENO-GUTIÉRREZ, J. (2022). The Influence of Emissions from Maritime Transport on Air Quality in the Strait of Gibraltar (Spain). *Sustainability*, 14(19), 12507. <https://doi.org/10.3390/su141912507>
- FENG, Y., DU, Z., SHREKA, M., ZHU, Y., ZHOU, S., & ZHANG, W. (2020). Thermodynamic analysis and performance optimization of the supercritical carbon dioxide Brayton cycle combined with the Kalina cycle for waste heat recovery from a marine low-speed diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 206(November 2019), 112483. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112483>
- FINLAND. (2016). *MEPC 70/INF.34 - Study on effects of the entry into force of the global 0.5% fuel oil sulphur content limit on human health*.
- FOOTE, E. (1856). Circumstances Affecting the Heat of Sun's Rays. *American Journal of Art and Science*, XXII(LXVI), 382–383. <https://publicdomainreview.org/collection/first-paper-to-link-co2-and-global-warming-by-eunice-foote-1856/>
- FORETICH, A., ZAIMES, 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>

- FUGLESTVEDT, J., BERNTSEN, T., EYRING, V., ISAKSEN, I., LEE, D. S., & SAUSEN, R. (2009). Shipping Emissions: From Cooling to Warming of Climate—and Reducing Impacts on Health. *Environmental Science & Technology*, 43(24), 9057–9062. <https://doi.org/10.1021/es901944r>
- GHAFORIAN MASODZADEH, P., ÖLÇER, A. I., BALLINI, F., & CHRISTODOULOU, A. (2022). A review on barriers to and solutions for shipping decarbonization: What could be the best policy approach for shipping decarbonization? *Marine Pollution Bulletin*, 184, 114008. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114008>
- GHAFORIAN MASODZADEH, P., ÖLÇER, A. I., BALLINI, F., & GONZALEZ CELIS, J. (2024). Live carbon-tracking mechanism for ships, a methodology to mitigate uncertainties in the carbon intensity calculations. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 23(March 2023). <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.101004>
- GLOSTEN. (2022). *Energy efficiency and decarbonization technical guide - U.S. Dep. Transport. Marit. Admin., Tech. Guide.*
- GOLDSMID, H. J. (2016). Introduction to Thermoelectricity. In *Materials for Energy Conversion Devices* (Vol. 121). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49256-7>
- HANLON, H. M., BERNIE, D., CARIGI, G., & LOWE, J. A. (2021). Future changes to high impact weather in the UK. *Climatic Change*, 166(3–4), 50. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03100-5>
- HANNAY, D. E., AINSLIE, M. A., TROUNCE, K. B., EICKMEIER, J., MACGILLIVRAY, A. O., MARTIN, S. B., & NOLET, V. (2023). *Recommended Procedures for Measuring Underwater Radiated Noise Emissions of Ships, for Quiet Ship Certification.*
- HENNINGSEN, R., SKJOLSVIK, K., ANDERSEN, A., CORBETT, J., & SKJELVIK, J. (2000). *Study of Greenhouse Gas Emissions from Ships Final Report to the International Maritime Organization.*
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. (2021). *IEC 61215-1:2021 - Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements.* <https://webstore.iec.ch/publication/68594>
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (1997). *MP/CONF.3/35 Resolution 8.* International Maritime Organization (IMO).
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2003). *Resolution A.963(23)-IMO Policies and Practices Related to the Reduction of Greenhouse Gas Emissions from Ships.*

- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2012). *Resolution MEPC.212(63) - 2012 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships.*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2016). *Resolution MEPC.282(70) - 2016 Guidelines for the Development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP).*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2018a). *MEPC.304(72) - Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships.*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2018b). *MEPC 72/16/5 - Reducing underwater noise utilizing ship design and operational measures.*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2018c). *MEPC 73/INF.23 - Scientific support for underwater noise effects on marine species and the importance of mitigation.*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2020). *IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions.* <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2021a). *Fourth IMO Greenhouse Gas Study. International Maritime Organization, 11, 951–952.*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2021b). *Resolution MEPC.334 (76) - 2021 Guidelines on survey and certification of the attained energy efficiency existing ship index (EEXI).*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2021c). *Resolution MEPC.335 (76).*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2023a). *MEPC.1/Circ.906 - Revised guidelines for the reduction of underwater radiated noise from shipping to address adverse impacts on marine life.*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2023b). *Resolution MEPC.376(80) - Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels (LCA Guidelines).*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2024a). *MEPC 81/6/13 - Industry project on the assessment of CII functionality.*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2024b). *MEPC 81/6/15 - Assessment of an alternative CII metric for ro-ro cargo and ro-ro passenger ships.*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2024c). *MEPC 81/6/18 - The implications of the 2023 IMO GHG Strategy and work on the basket of mid-term measures for the revision of the CII.*

- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2024d). *MEPC 81/6/5 - Considerations of ships' GHG emissions data quality and integrity as a basis for current and future IMO GHG regulatory measures.*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2024e). *MEPC 81/6/7 - A discrepancy in the definition of "capacity" for the CII calculations in the CII Guidelines, G1, and the CII Guidelines, G5.*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2024f). *MEPC 81/7/6 - Impact and extent of hydrogen emissions and impact on the LCA Framework.*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2024g). *MEPC 81/7/9 - The elements to be considered following the adoption of 2023 IMO GHG Strategy.*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2024h). *MEPC 81/INF.27 - Review of Carbon Intensity Indicator.*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2024i). *MEPC 81/INF.28 - Impact of short voyages on the Carbon Intensity Indicator.*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2024j). *MEPC 81/INF.29 - Impact of port waiting time on the Carbon Intensity Indicator.*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). (2024k). *MEPC 81/INF.32 - Impact of ship loading condition on the carbon intensity indicator.*
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO), International Chamber of Shipping, INTERTANKO, & RINA. (2024). *MEPC 81/6/16 - Consistent reporting of fuels to the IMO DCS.*
- JACOBSON, A. R., SCHULDT, K. N., ANDREWS, A., MILLER, J. B., ODA, T., BASU, S., MUND, J., WEIR, B., OTT, L., AALTO, T., ABSHIRE, J. B., AIKIN, K., AOKI, S., ALLEN, G., APADULA, F., ARNOLD, S., BAIER, B., BAKWIN, P., BĀNI, L., ... ZIMNOCH, M. (2023). *CarbonTracker CT-NRT.v2023-5*. NOAA Global Monitoring Laboratory. <https://doi.org/10.15138/FFXV-2Z26>
- JONES, M. W., PETERS, G. P., GASSER, T., ANDREW, R. M., SCHWINGSHACKL, C., GÜTSCHOW, J., HOUGHTON, R. A., FRIEDLINGSTEIN, P., PONGRATZ, J., & LE QUÉRÉ, C. (2023). National contributions to climate change due to historical emissions of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide since 1850. *Scientific Data*, 10(1), 155. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02041-1>
- KAWABUCHI, M., KAWAKITA, C., MIZOKAMI, S., HIGASA, S., KODAN, Y., & TAKANO, S. (2011). CFD predictions of bubbly flow around an energy-saving ship with Mitsubishi air lubrication system. *Mitsubishi Heavy Ind. Tech. Review*, 48(1), 53–57.
- KEELING, C. D. (1960). The concentration and isotopic abundances of atmospheric carbon dioxide in rural areas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 13(4), 322–334. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(58\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(58)90033-4)

- KHARROUBI, K., & SÖĞÜT, O. S. (2020). Modelling of the propulsion plant of a large container ship by the partition of the cycle of the main diesel engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 234(2), 475–489. <https://doi.org/10.1177/1475090219876515>
- KIM, Y.-R., & STEEN, S. (2023). Potential energy savings of air lubrication technology on merchant ships. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 15, 100530. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2023.100530>
- LEE, H., PARK, D., CHOO, S., & PHAM, H. T. (2020). Estimation of the Non-Greenhouse Gas Emissions Inventory from Ships in the Port of Incheon. *Sustainability*, 12(19), 8231. <https://doi.org/10.3390/su12198231>
- LEE, S.-S. (2024). Analysis of the effects of EEDI and EEXI implementation on CO2 emissions reduction in ships. *Ocean Engineering*, 295, 116877. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116877>
- MÆRSK MC-KINNEY MØLLER CENTER FOR ZERO CARBON SHIPPING. (2023). *MMMCZCS LCA Methodology for Calculating the GHG Intensity of Maritime Fuels*.
- MARLOW INDUSTRIES. (2015). *Technical Data Sheet for TG12-8 Single-Stage Thermoelectric Generator*. 1–2. www.marlow.com
- MINISTERIO DE TRANSPORTES Y MOVILIDAD SOSTENIBLE. (2023). *Flota de transporte abanderada en España (número de buques y miles de GT) por clase de buque y tipo de registro*. Dirección General de la Marina Mercante. <https://apps.fomento.gob.es/BDOTLE/visorBDpop.aspx?i=454>
- MURRAY, C. J. L., ARAVKIN, A. Y., ZHENG, P., ABBAFATI, C., ABBAS, K. M., ABBASI-KANGEVARI, M., ABD-ALLAH, F., ABDELALIM, A., ABDOLLAHI, M., ABDOLLAHPOUR, I., ABEGAZ, K. H., ABOLHASSANI, H., ABOYANS, V., ABREU, L. G., ABRIGO, M. R. M., ABUALHASAN, A., ABU-RADDAD, L. J., ABUSHOUK, A. I., ADABI, M., ... LIM, S. S. (2020). Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, 396(10258), 1223–1249. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2)
- OECD/ITF. (2018). *Reducing Shipping Greenhouse Gas Emissions: Lessons From Port-Based Incentives*. <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/reducing-shipping-greenhouse-gas-emissions.pdf>
- OUYANG, T., SU, Z., WANG, F., JING, B., HUANG, H., & WEI, Q. (2020). Efficient and sustainable design for demand-supply and deployment of waste heat and cold energy recovery in marine natural gas engines. *Journal of Cleaner Production*, 274, 123004. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123004>

- OUYANG, T., SU, Z., YANG, R., LI, C., HUANG, H., & WEI, Q. (2020). A framework for evaluating and optimizing the cascade utilization of medium-low grade waste heat in marine dual-fuel engines. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123289. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123289>
- PARK, S. H., & LEE, I. (2018). Optimization of drag reduction effect of air lubrication for a tanker model. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 10(4), 427–438. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2017.09.003>
- PAULOT, F., PAYNTER, D., NAIK, V., MALYSHEV, S., MENZEL, R., & HOROWITZ, L. W. (2021). Global modeling of hydrogen using GFDL-AM4.1: Sensitivity of soil removal and radiative forcing. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(24), 13446–13460. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.088>
- PAVLOV, G. A., YUN, L., BLIAULT, A., & HE, S.-L. (2020). *Air Lubricated and Air Cavity Ships*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0425-0>
- QI, X., LI, Z., ZHAO, C., LI, J., & ZHANG, Q. (2024). International governance of Arctic shipping black carbon emissions: Current situation and impediments to progress. *Marine Policy*, 161, 106043. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2024.106043>
- RITCHIE, H., ROSADO, P., & ROSER, M. (2020). Greenhouse gas emissions. *Our World in Data*.
- SAHA, M., TREGENZA, O., TWELFTREE, J., & HULSTON, C. (2023). A review of thermoelectric generators for waste heat recovery in marine applications. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 59, 103394. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103394>
- SELLERS, C. (2017). Field operation of a 125kW ORC with ship engine jacket water. *Energy Procedia*, 129, 495–502. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.168>
- SMITH, T. (2020). The Cost of Reducing Greenhouse Gas Emissions in Shipping. In *International Transport Forum Discussion Papers*. OECD Publishing.
- SMITH, T. W. P., JALKANEN, J. P., ANDERSON, B. A., CORBETT, J. J., FABER, J., HANAYAMA, S., O'KEEFFE, E., PARKER, S., JOHANSSON, L., ALDOUS, L., RAUCCI, C., TRAUT, M., ETTINGER, S., NELISSEN, D., LEE, D. S., NG, S., AGRAWAL, A., WINEBRAKE, J. J., & HOEN, A. M. (2014). *Third IMO Greenhouse Gas Study*.
- SOFIEV, M., WINEBRAKE, J. J., JOHANSSON, L., CARR, E. W., PRANK, M., SOARES, J., VIRÁ, J., KOUZNETSOV, R., JALKANEN, J.-P., & CORBETT, J. J. (2018). Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate tradeoffs. *Nature Communications*, 9(1), 406. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02774-9>

- SOUTHALL, B. L., & SCHOLIK-SCHLOMER, A. (2008). *Final report of the NOAA International Conference: "Potential Application of Vessel-Quieting Technology on Large Commercial Vessels."*
- SU, Z., OUYANG, T., CHEN, J., XU, P., TAN, J., CHEN, N., & HUANG, H. (2020). Green and efficient configuration of integrated waste heat and cold energy recovery for marine natural gas/diesel dual-fuel engine. *Energy Conversion and Management*, 209(February), 112650. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112650>
- SUPRAN, G., RAHMSTORF, S., & ORESKES, N. (2023). Assessing ExxonMobil's global warming projections. *Science*, 379(6628). <https://doi.org/10.1126/science.abk0063>
- U.S. SURFACE OFFICER WARFARE SCHOOL. (n.d.). *Ship's silencing program*. Retrieved March 14, 2024, from https://man.fas.org/dod-101/navy/docs/swos/stu2/NEWIS9_7.html
- UNCTAD. (2023). *Review of Maritime Transport 2023*. <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023>
- UNCTAD. (2024). *Navigating troubled waters Impact to global trade of disruption of shipping routes in the Red Sea, Black Sea and Panama Canal* (Issue February). <https://unctad.org/publication/navigating-troubled-waters-impact-global-trade-disruption-shipping-routes-red-sea-black>
- UNITED NATIONS. (1992). *United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- UNITED NATIONS. (2015). *United Nations Sustainable Development Sites*. Sustainable Development. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- VAKILI, S., ÖLÇER, A. I., & BALLINI, F. (2021). The development of a transdisciplinary policy framework for shipping companies to mitigate underwater noise pollution from commercial vessels. *Marine Pollution Bulletin*, 171, 112687. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112687>
- VARD MARINE INC. (2019). *Ship Underwater Radiated Noise, Report 368-000-01, rev 5*.
- VARD MARINE INC. (2021). *Assessment of Measures to Reduce Greenhouse Gases, Report 514-01-000-01*.
- VARD MARINE INC. (2023). *Ship Energy Efficiency and Underwater Radiated Noise, Report 545-000-01, rev 3. October*.
- WANG, JIANG, Y., HAN, F., YU, S., LI, W., JI, Y., & CAI, W. (2022). A thermodynamic configuration method of combined supercritical CO2 power system for marine engine waste heat recovery based on recuperative effects. *Applied Thermal Engineering*, 200(September 2021), 117645. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117645>

- WORLD BANK GROUP. (1998). Sulfur Oxides: Pollution Prevention and Control. In *Pollution Prevention and Abatement Handbook* (Issue July, pp. 245–249).
- YUAN, H., SUN, P., ZHANG, J., SUN, K., MEI, N., & ZHOU, P. (2019). Theoretical and experimental investigation of an absorption refrigeration and pre-desalination system for marine engine exhaust gas heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, 150(June 2018), 224–236. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.153>
- YUAN, T., SONG, H., WOOD, R., WANG, C., OREOPOULOS, L., PLATNICK, S. E., VON HIPPEL, S., MEYER, K., LIGHT, S., & WILCOX, E. (2022). Global reduction in ship-tracks from sulfur regulations for shipping fuel. *Science Advances*, 8(29). <https://doi.org/10.1126/sciadv.abn7988>.