

EL PUERTO MARÍTIMO: CORAZÓN DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA

THE SEA PORT: HEART OF THE ENERGY TRANSITION

Alexander Eslava Sarmiento ¹ 

¹ Universidad Nacional de Colombia, Colombia, **Email:** laeslavas@unal.edu.co

Para citar este artículo: Eslava Sarmiento, A. (2024). El Puerto Marítimo: Corazón de la Transición Energética. LOGINN Investigación Científica Y Tecnológica, 8(2). <https://doi.org/10.23850/25907441.6783>

Recibido: 13 de agosto de 2024

Aceptado: 25 de noviembre de 2024

Publicado en línea: 9 de Diciembre de 2024

Resumen

.....
Palabras

clave:

Transición
Energética,
Puertos
Marítimos,
Gases Efecto
Invernadero,
Descarboniza
ción,
Energías
Renovables,
Hidrógeno
Verde.

JEL: F18,
L92, M14,
Q42

Los puertos marítimos del mundo desempeñan un papel fundamental en la descarbonización de la economía mundial, al ser nodos logístico-comerciales clave dentro de la cadena global de suministro e impulsores de la cadena global de valor. En este contexto, la Organización Marítima Internacional ha adoptado una resolución que insta a los puertos a fomentar la cooperación voluntaria con la industria naviera para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de los buques. En las próximas décadas, se prevé que los puertos marítimos se transformen en centros energéticos de relevancia internacional. Este cambio implicará que las administraciones portuarias y los operadores de terminales trabajen de manera conjunta en la expansión de infraestructuras, la modernización de equipos y la implementación de tecnologías disruptivas asociadas a la Industria 4.0. Estas acciones estarán orientadas a mitigar el cambio climático global y facilitar la transición energética. Esto, con el objeto de alimentar equipos portuarios, suministrar y exportar «Bunker Green» a los buques de nueva tecnología que recalán en sus costas. Un puerto marítimo moderno, es un puerto que cumple con los requisitos ambientales actuales: “Cero Emisiones” indiscutiblemente el “Corazón de la Transición Energética”. El concepto conlleva la implementación de un sistema de suministro de energía inteligente, altamente eficiente, de fuentes de renovables, amigables con el medio ambiente, carentes de emisiones de GEI.

Abstract

.....
Keywords:

Energy
Transition,
Sea Ports,
Greenhouse
Gas,
Decarboniza
on,
Renewable
Energy,
Green
Hydrogen

The world's seaports play a fundamental role in the decarbonization of the global economy, being key logistics-commercial nodes within the global supply chain and drivers of the global value chain. In this context, the International Maritime Organization has adopted a resolution urging ports to encourage voluntary cooperation with the shipping industry to reduce greenhouse gas (GHG) emissions from ships. In the coming decades, seaports are expected to become energy centers of international relevance. This change will imply that port administrations and terminal operators work together on the expansion of infrastructure, the modernization of equipment and the implementation of disruptive technologies associated with Industry 4.0. These actions will be aimed at mitigating global climate change and facilitating the energy transition. This, with the aim of powering port equipment, supplying and exporting “Bunker Green” to new technology ships that call on its coasts. A modern seaport is a port that meets current environmental requirements: “Zero Emissions” indisputably the “Heart of the Energy Transition”. The concept involves the implementation of an intelligent, highly efficient energy supply system, from renewable sources, friendly to the environment, devoid of GHG emissions.

Introducción

Los puertos marítimos desempeñan un papel crucial en la transición energética proyectada hacia 2050, consolidándose como el eje central de este proceso. Tanto los buques como los puertos son elementos fundamentales para la economía global, ya que forman parte integral de la cadena global de suministro y la cadena global de valor (CGV). Actualmente, más del 93 % del comercio mundial transita a través de estas infraestructuras estratégicas. En línea con el crecimiento económico global y el aumento del transporte marítimo, la competencia entre puertos ha aumentado. La gobernanza de los puertos también ha cambiado.

Al mismo tiempo, la perspectiva está cambiando, de puertos como nodos de transporte independientes a puertos como elementos de sistemas de cadenas impulsadas por el valor y elementos de clúster portuario independientes pero interdependientes (Anas S. Alamoush, Fabio Ballini & Aykut I. Ölçer, 2024; Lu, B., 2024). Como centros de las CGV los puertos pueden facilitar la mejora ambiental (Ramos, S.J., & Yilmaz, U., 2023; Ramsay, W., Fridell, E. & Michan, M., 2023). a través de cuatro funciones: (1) como propietarios, al proporcionar tierras e infraestructura básica; (2) como reguladores, al fijar tarifas, estándares ambientales y planificación espacial; (3) como operadores de flotas propias, equipos e infraestructura básica; (4) como administradores comunitarios, al tener la capacidad de reunir las partes interesadas para mejorar la colaboración y el desempeño del mismo.

Un puerto se concibe como multifacético si lo constituye los siguientes alcances (Russo, F. & Musolino, G., 2024): (1) ser sitio particular de actividad económica; (2) ser nodo en redes de transporte e industrias; (3) ser redes heterogéneas de variados actores; (4) estar integrado por actores individuales (administración portuaria, gobernanza, autoridad portuaria). El primer alcance subraya que no hay puertos iguales. La ubicación geográfica y las actividades económicas in situ tienen implicaciones para las oportunidades y desafíos de los puertos en la transición a la sostenibilidad. El segundo implica que se necesita un conocimiento detallado de sus redes para evaluar la viabilidad de diferentes soluciones en ubicaciones portuarias específicas. El tercer alcance dirige la atención a las sinergias, los intereses en competencia y los horizontes temporales, y la necesidad de coordinación y codesarrollo. El cuarto sugiere que la administración portuaria es un actor clave tanto por derecho propio como en términos de coordinación de otros actores (Anas S. Alamoush, et al, 2024; Lun, Y.H.V., Lai, Kh., Cheng, T.C.E. & Yang, D., 2023).

En consecuencia, se comprende cómo surgen diferentes patrones y proporcionan nuevo conocimiento de los puertos como actores locales, integrados en un entorno donde tanto los factores institucionales como geográficos ejercen una fuerte influencia en sus estrategias y alcances en la transición energética. De hecho, los puertos como centros en la transición energética hacia 2050 podrían convertirse en las próximas décadas en centros energéticos de proporciones internacionales.

El término “Centros Energéticos” (CE) se refiere a la transformación de los grandes puertos, esenciales para el comercio global, en puertos energéticos sostenibles. En este sentido, los puertos como futuros “Centros de Descarbonización” (Zografakis, H., Henderson, N., Rigden Green, A., Mace-Kokota, D. & Turner KC, J.M., 2023) anticipan una transformación que incluirá la electrificación directa e indirecta de sus operaciones, las industrias ubicadas en sus cercanías, los buques marítimos y el transporte interior.

Dado que los puertos concentran múltiples sectores industriales, están llamados a convertirse en

pioneros de la transición energética, consolidándose como el núcleo de este proceso. A nivel general, un centro energético puede definirse como “una unidad donde se pueden convertir, acondicionar y almacenar múltiples portadores de energía, funcionando como una interfaz entre diferentes infraestructuras y/o cargas energéticas” (Lind, M., Haraldson, S., Lehmacher, W., Raza, Z., Forsström, E., Astner, L., Bentham, J.B., Fu, X., Suroto, J. & Zuesongdam, P., 2023).

La transición de los puertos hacia su rol como CE está influenciada por un panorama más amplio de desarrollos exógenos. El creciente conocimiento y la mayor conciencia sobre el cambio climático global (CCG), sus impactos y sus implicaciones, han generado un impulso significativo. Los escenarios energéticos predominantes han influido profundamente en las políticas energéticas y de transporte, promoviendo la reducción de los sectores basados en combustibles fósiles y facilitando la adopción de alternativas de bajas y cero emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

El concepto de “Actividades Relacionadas con los Puertos” es amplio y engloba diversos tipos de operaciones (Lind, M., Haraldson, S., Carson-Jackson, J., Gardeitchik, J., Singh, S., Zuesongdam, P., Morton, R., Pettersson, S., Pernia, O. & Larsen, S.E., 2021). Tradicionalmente, estas actividades se asocian con la facilitación de: (a) la llegada y salida de buques; (b) servicios de ayuda a la navegación y separación del tráfico marítimo; (c) tareas de practica, remolque y amarre; (d) uso de atracaderos, muelles, silos, tanques e instalaciones de carga; (e) descarga, almacenamiento y distribución de mercancías; y (f) logística y gestión de la cadena de suministro.

Sin embargo, el desarrollo y la operación de actividades energéticas, como la producción de hidrógeno verde mediante electrólisis o el aprovechamiento de energía solar y eólica dentro de las zonas portuarias, suelen percibirse como menos tradicionales en el ámbito portuario. En este contexto, los puertos marítimos están llamados a desempeñar un papel fundamental en la promoción de tecnologías más limpias, vectores energéticos verdes y conceptos logísticos innovadores aplicados al transporte marítimo (Alamouh, A.S., et al., 2024; Otaki, T. & Shaw, R., 2024).

Además, estas innovaciones tendrán un impacto significativo en las operaciones portuarias, tales como la transferencia de carga y el almacenamiento, así como en los modos de transporte interior, incluyendo el transporte por carretera, ferrocarril y vías lacustres o fluviales. Todo ello con el propósito de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y avanzar hacia un modelo de transporte más sostenible.

Gases Efecto Invernadero (GEI)

La crisis del cambio climático global (CCG), causada principalmente por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), se está agravando, generando incendios forestales masivos, huracanes, sequías, inundaciones y un aumento del nivel del mar, con impactos significativos sobre millones de personas. Para mitigar el CCG y reducir las emisiones de GEI, todas las industrias deben alinearse con el objetivo del Acuerdo de París, que establece limitar el aumento de la temperatura global muy por debajo de 1,5 °C.

Las emisiones de GEI provenientes del transporte marítimo y portuario no son una excepción, ya que contribuyen significativamente al CCG. Por ello, la descarbonización del transporte marítimo se ha convertido en una prioridad (Alamouh, A.S., et al., 2024; Dere, C., 2023; Kumar, M., & Sharma, S., 2024; Sugimura, Y., 2023). Este proceso lidera la agenda de mediano plazo de la industria marítima e influirá de manera decisiva en las inversiones estratégicas y en la planificación de los próximos años.

Aunque el transporte marítimo se considera eficiente en términos de emisiones por unidad de carga transportada, sus emisiones de GEI lo posicionan como el tercer mayor emisor a nivel global. En este contexto, las emisiones generadas en los puertos representan aproximadamente el 5 % del total de las emisiones del transporte marítimo, lo que en algunos puertos podría equivaler al 50 % de sus emisiones totales.

La Organización Marítima Internacional (OMI) adoptó una resolución que insta a los puertos de todo el mundo a fomentar la cooperación voluntaria con la industria naviera para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de los buques. En este contexto, la contribución de los puertos a la descarbonización del transporte marítimo puede justificarse por diversas razones. En primer lugar, los puertos reaccionan e implementan regulaciones de descarbonización (Ghosh, B., 2024; Dere, C., 2023a; Dere, C., 2023b; Tsiulin, S., & Reinau, K.H., 2023), especialmente las disposiciones supranacionales de la OMI. En segundo lugar, los puertos contribuyen a los esfuerzos de sostenibilidad y a la implementación del concepto de puerto verde.

En tercer lugar, los puertos mejoran la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (ODS), en particular el objetivo 13 (mitigación del cambio climático) y el objetivo 7 (uso de energía renovable). En cuarto lugar, los puertos contribuyen a la responsabilidad social corporativa y responden a la presión de las partes interesadas marítimas, el público y la comunidad, y de las Organizaciones No Gubernamentales (ONG) ambientalistas. En quinto lugar, los puertos marítimos son los más interesados en mitigar el CCG porque este pone en peligro la infraestructura y las operaciones de los mismos. Por último, los puertos mejoran la confianza en sus negocios y la “imagen” de reputación verde, mientras que al mismo tiempo gestionan la seguridad energética y la eficiencia (reducción de costos).

Estudios (Akyar, D.A., & Ceylan, B.O., Celik, M.S., 2023) revelan que el 15 % de las emisiones de los buques se producen cuando los buques están parados, en fondeo o atracado en puerto, por lo que la intensidad podría llegar a ser tres veces mayor que cuando los buques están navegando. No obstante, las medidas de Interfaz Buque-Puerto (Anas S. Alamoush, et al, 2024; Raza, Z., & Singh, S., 2023) contribuye a la reducción del 1 % de las emisiones GEI del transporte marítimo, además del 3% mediante el suministro de energía en tierra «Onshore Power Supply», (OPS), lo que equivale a 30 Megatoneladas (30 millones de toneladas) de emisiones de CO₂ del transporte marítimo internacional.

Se argumenta que la reducción de las emisiones de GEI del transporte marítimo puede exceder el porcentaje de reducción en la Interfaz Buque-Puerto, considerando que los puertos tienen un papel clave en la mejora ambiental y en la ecologización de las cadenas de transporte y de la CGS y la CGV. No obstante, las emisiones portuarias de GEI son grandes teniendo en cuenta que hay miles de puertos en todo el mundo. Sin embargo, no es superior a la emitida por el transporte marítimo y terrestre en las zonas portuarias. La intensidad de las emisiones de los buques en los puertos aumenta hasta cinco veces más en comparación con las emisiones en navegación, que podrían alcanzar el 5 % o incluso hasta el 15 % de las emisiones totales de GEI del transporte marítimo (Biswajit Ghosh, 2024; Dere, C., 2023a; Dere, C., 2023b), lo que representa diez veces más que las emisiones de la operación portuaria.

De otro lado, las operaciones portuarias implican la interacción con cadenas de transporte como vías navegables interiores, embarcaciones nacionales y oceánicas, y transporte terrestre como camiones, ferrocarriles y locomotoras (Anas S. Alamoush, et al, 2024; Renken, K. & Petersen, M.,

2023). La mayoría de estas actividades dependen de combustibles fósiles y también consumen enormes cantidades de energía, generando así considerables emisiones de GEI. Y, dado que la carga manipulada en los puertos debe transportarse al interior del continente, el transporte terrestre portuario también genera altas emisiones de GEI (Akyar, D.A. et al, 2023).

Se prevé que el comercio marítimo experimente un incremento significativo, lo que conllevará un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del transporte marítimo en un rango estimado del 50 % al 250 % para 2050. Este crecimiento también afectará las emisiones portuarias de GEI, impulsadas por la creciente demanda de servicios portuarios y transporte terrestre asociado.

Esta tendencia intensifica el cambio climático global (CCG) y, en consecuencia, el calentamiento global, generando efectos adversos como inundaciones, huracanes, sequías, aumento del nivel del mar y alteraciones en los patrones de circulación oceánica. Además, estas condiciones contribuyen al deterioro de la infraestructura portuaria y afectan negativamente las operaciones.

En este contexto, la reducción de las emisiones de GEI en los puertos sigue siendo un desafío considerable debido a la alta intensidad energética requerida para sus actividades. La transición hacia operaciones más sostenibles en los puertos y la adopción de tecnologías limpias serán esenciales para mitigar estos impactos y contribuir a la lucha contra el cambio climático.

Las regulaciones para mitigar el cambio climático, ya sean nacionales, regionales o internacionales, se aplican a los puertos de todo el mundo (Ghosh, B., 2024; Dere, C., 2023a; Dere, C., 2023b; Urban, F., Nurdawati, A., & Harahap, F., 2024). Aunque los puertos reconocen las externalidades ambientales asociadas a sus actividades, su papel en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) es crucial para alcanzar el objetivo del Acuerdo de París de limitar el aumento de la temperatura global a entre 1,5 °C y 2 °C.

Para cumplir con este objetivo, todos los sectores, incluido el transporte marítimo, deben avanzar en su descarbonización. Las partes interesadas, las comunidades locales y los clientes marítimos demandan con creciente insistencia la reducción de las emisiones portuarias de GEI, lo que aumenta la presión sobre los puertos para demostrar su compromiso ambiental y fortalecer su credibilidad en este ámbito. En consecuencia, los puertos están sometidos a un riguroso escrutinio respecto a sus acciones frente al cambio climático (Alamouh, A.S., et al., 2024; Ramos, S.J., et al., 2023).

Para mantener sus licencias de operación y responder a estas demandas, los puertos han desarrollado e implementado políticas portuarias verdes destinadas a reducir las emisiones totales. Estas políticas no solo refuerzan su responsabilidad social corporativa, sino que también mejoran su reputación ecológica, incrementando la confianza de las partes interesadas.

A través de medidas de eficiencia energética, los puertos han logrado disminuir su huella de carbono, mejorar la seguridad energética y reducir los costos asociados al consumo de energía (Alamouh, A.S., et al., 2024; Lun, Y.H.V., et al., 2023). Estas iniciativas son reconocidas como pilares fundamentales para la planificación y el desarrollo de puertos verdes y sostenibles, que desempeñan un papel clave en la transición hacia un futuro más respetuoso con el medio ambiente.

Así, los puertos marítimos “Corazón de la Transición Energética” están reduciendo sus emisiones de GEI utilizando diversas medidas técnicas y operativas, como la electrificación y la hibridación de los equipos de manipulación de carga, y medidas de eficiencia energética (Peggy Shu-

Ling Chen, Hongjun Fan, Hossein Enshaei, Wei Zhang, Wenming Shi, Nagi Abdussamie, Ta-kashi Miwa, Zhuohua Qu & Zaili Yang, 2023). De hecho, el papel de los puertos en la reducción de las emisiones de GEI no sólo se limita a las operaciones portuarias, también abarca los buques oceánicos y el transporte terrestre interior y la CGS.

En este contexto, los puertos facilitan y apoyan la reducción de las emisiones de GEI del transporte marítimo, junto con la regulación supranacional de la OMI. Esto refuerza el compromiso de la OMI (estrategia inicial de GEI) de reducir a la mitad las emisiones de GEI del transporte marítimo internacional para 2050 en comparación con 2008, al tiempo que se intenta eliminarlas por completo (Anas S. Alamoush, et al, 2024; Raza, Z., et al, 2023). Además, la OMI adoptó una resolución que fomentaba la cooperación voluntaria de los puertos de los estados miembros para facilitar la reducción de las emisiones de GEI del transporte marítimo.

Centros Energéticos

Actualmente, el papel de los puertos marítimos se percibe como más amplio que el de simplemente centros de transbordo, ya que se reconoce cada vez más su importancia como los llamados Centros Energéticos (CE). Este nuevo papel se destaca en el nuevo enfoque de la Economía Circular hacia la “Economía Azul” (Biswajit Ghosh, 2024; Dere, C., 2023a; Dere, C., 2023b; Tsiulin, S., et al, 2023; Zubavichus, R. & Kharitonov, M., 2023): su futuro reside en desarrollar sistemas integrados de electricidad, hidrógeno y otros combustibles renovables y bajos en carbono. De hecho, los puertos pueden gestionar y administrar el suministro de combustibles alternativos “Bunker Green” y proporcionar la infraestructura necesaria para su abastecimiento.

Por tanto, la visión más progresista de los puertos del futuro es la de centros energéticos integrados para el transporte marítimo y terrestre, que faciliten la distribución de energía (abastecimiento de combustible y carga), así como la producción y conversión de combustibles y vectores de energía (Zhe Wang, Bo Dong, Jinjun Yin, Mingyu Li, Yulong Ji & Fenghui Han., 2024). Debido a que operan en la intersección entre el transporte terrestre y marítimo, y albergar actores industriales de uso intensivo de energía, los puertos tienen una posición ventajosa para convertirse en centros de generación, conversión y distribución de energía renovable.

A medida que avance la descarbonización del transporte marítimo, las instalaciones habituales para el abastecimiento de combustibles convencionales se complementarán o reemplazarán gradualmente con instalaciones para el abastecimiento y carga de gases licuados o combustibles a base de hidrógeno durante los próximos 25 años (Anas S. Alamoush et al, 2024). Esto requerirá inversiones adicionales en instalaciones e infraestructuras de almacenamiento, ya que la menor densidad energética de los combustibles alternativos también puede requerir un mayor número de instalaciones de abastecimiento de combustible, y los buques tendrán que repostar combustible con mayor frecuencia.

Esto puede conducir a la descentralización de los centros de combustible (Oleksiy Melnyk, Oleg Onishchenko, Svitlana Onyshchenko, Nadiia Yaremenko, Eduard Maliuha, Iryna Honcharuk & Oleksii Shamov, 2024), creando oportunidades para modernizar o desarrollar la infraestructura de abastecimiento de combustible en los países y puertos que hasta ahora no han tenido una participación significativa (o nula) en esto. Con nuevas oportunidades comerciales y de desarrollo relacionadas con la transición energética en el transporte marítimo, dichos puertos pueden ingresar al mercado global de combustibles búnkeres de cero emisiones. Parece obvio, que la descarbonización del transporte marítimo sin la participación activa de los puertos sea imposible de lograr, ya que tanto los puertos

como el transporte marítimo están intrínsecamente entrelazados.

Por tanto, para que los puertos se transformen en esta dirección es necesario que se produzcan cambios sustanciales tanto en estos como entre los usuarios de los mismos (Biswajit Ghosh, 2024; Dere, C., 2023a; Dere, C., 2023b; Lu, B., 2024; Lun, Y.H.V. et al, 2023); los puertos pueden implementar diversas medidas para abordar cuestiones relacionadas con el clima y la energía, como proporcionar combustibles alternativos o mejorar la eficiencia energética en las operaciones portuarias. En ausencia de impulsores sólidos (exigencias regulatorias), es poco probable que muchos puertos proporcionen combustibles alternativos con bajas o nulas emisiones de carbono, dada la alta complejidad de esta medida. Sin embargo, con una atención cada vez mayor a las emisiones de GEI y al CCG, es posible que se produzcan cambios. Otras medidas, como un uso más eficiente de la energía en los puertos, pueden implicar una baja complejidad de implementación.

Evidentemente, los puertos toman medidas técnicas y operativas para reducir las emisiones de GEI del transporte marítimo con el suministro de energía en tierra (OPS) o con la facilitación del arribo virtual y el sistema de amarre automático (Iris, Çağatay & Lam, Jasmine Siu Lee., 2019). Los puertos facilitan la descarbonización del transporte marítimo adoptando medidas técnicas y operativas en la “Interfaz Buque-Puerto”. Las medidas incluyen (Biswajit Ghosh, 2024; Dere, C., 2023a; Dere, C., 2023b): (1) suministro de energía a partir de luz LED, energía solar, fotovoltaica y eólica sistemas de recuperación de calor residual, almacenamiento de energía (baterías y supercondensadores) fuentes renovables y sistemas de carga de baterías para buques eléctricos; (2) suministro de combustible como GNL, amoníaco, metanol e hidrógeno, (3) facilitación de la llegada virtual del transporte marítimo, atraque justo a tiempo y reducción de la velocidad de los buques, mediante la utilización del intercambio electrónico de datos, PortCDM y otras tecnologías digitales; (4) reducción del tiempo de respuesta de los buques (inactivo), a través de la asignación de atraques, asignación y programación de patios, sistema de operación y automatización de terminales de contenedores, sistemas automatizados de amarre y las operaciones «mid-stream»; (5) prestación de servicios diversos como limpieza de cascos y pulido de hélices y bombas eléctricas en tierra.

Medidas Técnicas y Operativas Para Reducir Emisiones GEI

Desde hace más de una década, algunos puertos marítimos vienen tomando medidas para contribuir a la descarbonización y a la reducción de GEI. Para tal, implementando cambios que afectan a los propios puertos e industrias asentadas dentro de la zona portuaria (Alamoush, A.S., Dalaklis, D., Ballini, F., & Olcer, A.I., 2023); Iris, Çağatay, et al, 2019). Entre otras, se tienen: reducir las velocidades en los canales de navegación; planes de incentivos para los buques (diferenciación de derechos portuarios); operaciones de manipulación de carga más automatizadas y eficaces; mejora de la coordinación y sincronización entre buques y puertos (arribo “Justo a Tiempo” de los buques); suministro de energía para buques en tierra; suministro de bunker alternativo (hidrógeno verde); reducción de los tiempos de respuesta en el atraque; implementación de programas de incentivos que faciliten el ahorro de combustible dentro del puerto; inversión en tecnologías y equipos de manipulación ecológicos en grúas, montacargas y remolques; desarrollo de conexiones intermodales hacia y desde el interior del puerto.

Las actividades inmediatamente enunciadas, se relacionan con operaciones multidireccionales, con medidas técnicas operativas. Esto, con el objeto de reducir las emisiones de GEI. A continuación, se detallan algunas de ellas:

Ahorro de Energía. Iluminación LED, uso de energía solar, fotovoltaica y eólica (rotores «Flettner»), tecnologías de eficiencia energética, accesorios para suministro de energía en tierra (OPS), sistemas de recuperación de calor residual (ciclo Rankine de vapor, ciclo Rankine orgánico, ciclo Kalina), almacenamiento de energía (baterías y supercondensadores) (Anas S. Alamoush, et al, 2024; Lun, Y.H.V., et al, 2023).

Interfaz Buque-Puerto. La interfaz mejora de la eficiencia operativa y reduce las emisiones de los buques que hacen escala en los puertos; a través del suministro de energía en tierra OPS, (Alamoush, A.S., et al, 2023; Iris, Çağatay, et al, 2019), bunkering de combustibles alternativos (hidrógeno verde (H₂), metanol, amoníaco, biocombustibles); electrificación de equipos, hibridación; empleo de energía renovable para proporcionar electricidad verde (energía solar, eólica, oceánica y geotérmica). La magnitud de las emisiones de GEI del transporte marítimo en la zona portuaria es alta; sin embargo, el potencial para reducir las emisiones de los buques depende de la frecuencia con la que estos vuelvan a visitar los puertos; cuanta más escala haga un buque, más fácil será facilitar su reducción de emisiones. Los buques se conectarían a OPS proporcionados por una red portuaria local, mientras sus motores y calderas auxiliares están apagados. El potencial de OPS para reducir los GEI es alto (Alamoush, A.S., et al, 2023), y depende de la fuente de electricidad. El mejor resultado es cuando la red depende de energías renovables o, una combinación: eólica o hidráulica o solar y eólica. En general, el suministro de OPS puede reducir el CO₂ de los buques entre un 48 % y un 70 %.

Tecnología Planchado en Frío «Cold Ironing». También conocida como conexión a tierra, o potencia marítima alternativa, y es el proceso de proporcionar en tierra energía eléctrica a un buque en el muelle, mientras que los motores principales y auxiliares se apagan. Por lo general, poco después de que un buque llega a un puerto y atraca, el generador principal se apaga mientras el generador auxiliar diésel se enciende para suministrar energía para comunicaciones, iluminación, ventilación, manejo de carga y otras actividades (Anas S. Alamoush, et al, 2024; Czernański, E. & Cirella, G.T., 2022). El generador auxiliar utiliza combustible barato y de baja calidad, lo que resulta en una baja eficiencia del combustible, altas pérdidas y altas emisiones de GEI, creando un importante efecto de “Chimenea Flotante” en el mar.

Una medida importante para reducir las emisiones durante el atraque es utilizar la energía de tierra para suministrar electricidad al buque en lugar de utilizar los motores auxiliares a bordo. La tecnología «Cold Ironing» se refiere a la práctica de apagar el generador auxiliar diésel del propio buque y utilizar el sistema de energía en el muelle para proporcionar electricidad al buque (Brundu, B. & Carboni, S., 2024; Innes, A. & Monios, J., 2018; Czernański, E., et al, 2022). De esta manera se puede lograr la electrificación desde la costa hasta el buque. Los estudios han demostrado que el uso de tecnología de «Cold Ironing» reduce las emisiones portuarias globales en un 10 %. Sin embargo, los efectos de la reducción de emisiones varían significativamente entre los diferentes puertos debido a diferencias de políticas y variaciones en los estándares de cobro en diferentes países y regiones.

De hecho, cuando los cruceros están atracados, se requiere una gran cantidad de electricidad para las actividades de los pasajeros, lo que hace que la demanda de energía en tierra sea más urgente. Un estudio analizó casos de cruceros en tres regiones diferentes y encontró que el uso de energía terrestre puede reducir en promedio las emisiones de gases de efecto invernadero en un 30 % (Alamoush, A.S., et al, 2023; Brundu, B., et al, 2024; Innes, A., et al, 2018; Santiago, J.I.P., Gutiérrez, D.D. & Fernández, R.P., 2024). En Noruega, Francia y Brasil, los puertos de cruceros redujeron las emisiones de CO₂ en un 99,5, 84,9 y 85,3 %, respectivamente (Santiago, J.I.P., et al, 2024), mediante el uso de tecnología de energía «Cold Ironing»

Medidas de Equipamiento. Implican el cambio físico o la sustitución de equipos antiguos por tecnologías limpias y nuevas desde el punto de vista energético (remolcadores, equipo de manipulación de carga («Cargo Handling Equipment», (CHE)) (Lun, Y.H.V., et al, 2023). La sustitución de equipos terminales propulsados por diésel minimiza el consumo de energía y las emisiones de CO₂ (electrógenos en grúas RTG).

Electrificación de Equipos Logísticos. Los puertos marítimos suministran amplios servicios logísticos a los buques atracados a través de una variedad de diferentes tipos de equipos logísticos, incluidas grúas de muelle, grúas de patio, cintas transportadoras y vehículos de transferencia (apiladores retráctiles, carretillas pórtilco y carretillas elevadoras). Tradicionalmente, estos equipos logísticos se accionaban casi todos manualmente. En la actualidad, se ha automatizado con el objeto de mejorar la eficiencia y reducir los costos laborales (Anas S. Alamoush, et al, 2024; Iris, Çağatay, et al, 2019; Czernański, E., et al, 2022). Las fuentes de energía para estos dispositivos también se han diversificado. En consecuencia, la electrificación de los equipos logísticos en los grandes puertos es una tendencia irreversible; pronto se convertirán en una realidad, lo que ayudará a promover el desarrollo ecológico y con bajas emisiones de CO₂ o en los puertos marítimos.

Medidas Energéticas. Implica el suministro de energía limpia mediante combustibles limpios, suministro de energía alternativa o la utilización de energía renovable. El hidrógeno verde (H₂) se utiliza en dispositivos de pilas de combustible (Anas S. Alamoush, et al, 2024; Biswajit Ghosh, 2024; Czernański, E., et al, 2022; Dere, C., 2023a; Dere, C., 2023b) y el amoníaco se utiliza como combustible para embarcaciones domésticas, ferries, vehículos y generación eléctrica. El hidrógeno se considera combustible renovable si se genera a partir de electricidad renovable. Los puertos marítimos pueden utilizar combustibles renovables y generación de biomasa.

Redes Inteligentes (RI). Una red inteligente es un sistema automatizado centralizado que gestiona el flujo de energía desde la red a los consumidores de electricidad y desde los consumidores a la red, utilizando sensores y monitores de tecnologías de la información y a la Industria 4.0 (Anas S. Alamoush, et al, 2024; Czernański, E., et al, 2022; Lun, Y.H.V., et al, 2023). La RI aprovecha el potencial de las energías renovables, reduce el CO₂ e integra en la red sistemas de almacenamiento de energía en CHE y baterías de vehículos.

Central Eléctrica Virtual (CEV). Subdivisión de la RI, controla y proporciona decisiones racionales sobre cuándo utilizar instalaciones de generación de energía, como generadores de energía renovable, generadores convencionales o plantas combinadas de calor y energía. Los puertos son un potencial para CEV ya que aumenta la seguridad energética y la utilización de energías renovables, disminuyendo así las emisiones totales de GEI (Anas S. Alamoush, et al, 2024; Iris, Çağatay, et al, 2019).

Isla de Energía (Microrred). Construye una entidad única que controla los recursos energéticos distribuidos; puede conectarse y desconectarse de la red principal para funcionar tanto en modo conectado a la red como en modo isla. La microrred aumenta la penetración de la energía renovable e integra el almacenamiento de esta, la cogeneración y otros generadores de respaldo con el potencial de controlar la oferta frente a la demanda. De este modo, la energía portuaria podría suministrarse de forma independiente en “Modo Isla”. Estudios (Anas S. Alamoush, et al, 2024; Czernański, E., et al, 2022; Iris, Çağatay, et al, 2019; Lun, Y.H.V., et al, 2023) revelan que el 75 % de la demanda de electricidad de un puerto puede agregarse a la red cuando una microrred controle la energía solar y

eólica y el almacenamiento en baterías.

Digitalización. Soluciones digitales que identifican, monitorean y agregan valor a los datos (teledetección, Internet de las cosas (IoT), análisis Big Data), en busca de la eficiencia operativa (flujos logísticos inteligentes) y el cuidado del medio ambiente (reducción del consumo de combustible); reducción del tiempo de respuesta con el empleo de navegación electrónica, con el intercambio electrónico de datos con otros puertos, con la integración de sistemas de comunidades portuarias (Lun, Y.H.V., et al, 2023) y ventanillas únicas; uso de Big Data, Blockchain, Internet de las Cosas (IoT), Gemelos Digitales (proporcionan información sobre la demanda de energía y permiten comprobar escenarios alternativos, la ubicación óptima de la infraestructura energética para reducir las pérdidas de transmisión y la aplicabilidad de transferencia de energía dentro del área portuaria durante los períodos de máxima demanda), Drones, Ciberseguridad y conectividad de banda ancha a Internet a través de comunicaciones móviles y satelitales (Stahlbock, R., Heilig, L., Cammin, P. & Voß, S., 2020).

Software de Optimización. Enrutamiento meteorológico, optimización de rutas, optimización de trimado, recopilación y análisis de datos sobre el consumo de combustible; análisis de datos avanzados (Big-Data) e Inteligencia Artificial (IA) para la optimización del consumo de energía (redes neuronales artificiales).

Sistema de Operación y Automatización de Terminales de Contenedores «Container Terminal Automation and Operation System», (TOS). La automatización de CHE aumenta la eficiencia del terminal portuario, reduce los costos y las emisiones GEI utilizando «Automated Guided Vehicles», (AGV) y grúas para contenedores «Ship-to-Shore», (STS) automatizadas, grúas apiladoras y carretillas pórtico. TOS es un software de optimización que planifica, gestiona y monitorea las operaciones «Cargo Handling Equipment», CHE. La optimización del equipo terminal reduce los cambios adicionales de contenedores, las distancias de viaje y los desequilibrios de peso, y minimiza los levantamientos innecesarios (Anas S. Alamoush, et al, 2024; Czernański, E., et al, 2022; Iris, Çağatay, et al, 2019; Lun, Y.H.V., et al, 2023). TOS analiza cuestiones operativas cruciales, como el problema de asignación de atracaderos y patios, el problema de despacho de camiones y los procesos auxiliares. El problema de la asignación de atraques y la programación del equipo de astillero se analizan en las medidas de Interfaz Buque-Puerto. La optimización de la superficie de la terminal reduce el consumo de energía y las emisiones de CO₂ aproximadamente un 70 % (Anas S. Alamoush, et al, 2024).

Cambio Modal. Implementar transporte intermodal, trasladar la carga por ferrocarril, barcazas y por transporte marítimo de corta distancia aumenta la eficiencia de los puertos y terminales. Reduce las emisiones de GEI, ya que el transporte de carga por ferrocarril reduce las emisiones de CO₂ y se considera económico y ambientalmente superior al transporte de carga en camiones (Alamoush, A.S., et al, 2023; Anas S. Alamoush, et al, 2024). El concepto de autopistas de los mares, enlaces ferroviarios y puertos secos agilizan las operaciones logísticas y mejorar la eficiencia operativa. Estos esfuerzos tienen un impacto directo en la reducción de CO₂. Los puertos secos y terminales interiores, mejoran los flujos de carga y minimizan el tiempo de respuesta de los buques y camiones.

Abastecimiento de Combustible Alternativo «Bunker Green». Los puertos marítimos pueden participar activamente en la reducción de las emisiones de GEI del transporte marítimo al contar con infraestructura de abastecimiento de combustible alternativo (Biswajit Ghosh, 2024; Dere, C., 2023a; Dere, C., 2023b) o tanques móviles de abastecimiento de combustible. El agua fría de las instalaciones

de regasificación del puerto se utiliza para refrigeración y el calor residual de la central eléctrica se utiliza para alimentar la unidad de regasificación. Aun así, existen cuestiones de seguridad, suministro y mercado que los puertos que desarrollan dicha infraestructura deben abordar y tener en cuenta.

Energía Renovable. La energía renovable incluye fuentes como la solar, eólica, mareomotriz, undimotriz y geotérmica, entre otras (Anas S. Alamoush, et al, 2024; Brundu, B. & Carboni, S., 2024; D. Pivetta, C. Dall'Armi, P. Sandrin, M. Bogar & R. Taccani, 2024; Magdy Tawfik, Ahmed S. Shehata, Amr Ali Hassan & Mohamed A. Kotb., 2023). A diferencia de los combustibles fósiles, la energía renovable tiene una tasa de regeneración rápida y no produce emisiones de GEI. Es una herramienta tecnológica importante para lograr puertos bajos en CO₂. En los últimos años, el uso de energías renovables en los puertos marítimos se ha generalizado cada vez más. La literatura técnica, ha estudiado la importancia de la energía renovable en el establecimiento de puertos bajos en CO₂. En efecto, considera el porcentaje de energía procedente de recursos renovables como un importante índice de rendimiento clave (KPI) para puertos inteligentes sostenibles.

No obstante, la planificación y disposición de las energías renovables en los puertos sigue siendo un área que requiere mayor estudio. Tomando como referencia las energías fotovoltaica y eólica, las más utilizadas, se debe garantizar que los lugares seleccionados para la instalación de paneles fotovoltaicos dispongan de suficiente radiación solar. La energía fotovoltaica suele instalarse en los tejados, por lo que es fundamental evaluar los requisitos de carga para los sistemas de energía fotovoltaica distribuidos, especialmente en los tejados de grandes almacenes y edificios en zonas portuarias de nueva construcción.

Según Alamoush, A.S., et al. (2023), Pivetta, D.C., et al. (2024) y Lun, Y.H.V., et al. (2023), la instalación de aerogeneradores en puertos debe considerar múltiples factores, incluyendo las condiciones cambiantes del mar, los rangos de selección reservados para las líneas de eje, los anchos navegables de los canales de entrada, las distancias de seguridad entre fondeaderos y canales de navegación, así como la escala de los fondeaderos. Además, es esencial respetar las distancias de seguridad entre los fondeaderos y los límites de los parques eólicos.

Con el ajuste de la escala portuaria, se vuelve igualmente necesario adaptar el diseño de las infraestructuras de energía renovable. Este diseño debe ser seguro, eficiente y económicamente viable, garantizando que las soluciones energéticas implementadas en los puertos respondan tanto a los desafíos técnicos como a las demandas de sostenibilidad.

Hidrógeno Verde (H₂). Los puertos marítimos son zonas que cuentan con energía renovable y con abundante recurso hídrico. La energía renovable (solar, eólica) se puede utilizar para electrolizar agua para producir y utilizar H₂ libre de contaminación y cero emisiones GEI (Biswajit Ghosh, 2024; D. Pivetta, C., et al, 2024; Dere, C., 2023a; Dere, C., 2023b; Enjiang Zhou, Xiao Liu, Zhihang Meng, Song Yu, Jinxiu Mei & Qiang Qu, 2023; Gan, S., 2022; Inal, O.B., Zincir, B. & Dere, C., 2022; Pellegrini, L.A., Spatolisano, E., Restelli, F., De Guido, G., de Angelis, A.R. & Lainati, A., 2024). La energía del H₂ se puede aplicar a muchos escenarios en los puertos, como desplazamientos, vehículos de transporte, maquinaria de carga y descarga portuaria «Cargo Handling Equipment». De igual forma, el H₂ en los puertos marítimos se puede suministrar como combustible «Bunker Green» a buques y/o exportarlo, y/o distribuirlo a interior del país con el objeto de cubrir la demanda energética. Como fuente de energía limpia sin emisiones contaminantes y sin emisiones de GEI, la energía del hidrógeno se ha convertido en el foco de la promoción de la energía limpia.

Reducción del Tiempo de Respuesta del Buque «Ship Turnaround Time», (TAT). La reducción del TAT en los puertos marítimos depende del horario de apertura de las terminales, las operaciones de estiba, la disponibilidad de atraques y la eficiencia del CHE. La eficiencia de CHE disminuye las emisiones de TAT y CO₂. Investigaciones recientes revelan que al reducir el TAT en un 30 %, consecuentemente lo harán las emisiones de CO₂ en un 37 %. Por el contrario, cuando la TAT aumenta un 30%, las emisiones de CO₂ aumentarían anualmente un 30,7 %. Reducir el TAT de una a cuatro horas produce un ahorro de energía del 2 al 8 % (Anas S. Alamoush, et al, 2024; Alamoush, A.S., et al, 2023). De similar importancia, indican las investigaciones, la mayor emisión de GEI proviene de los buques portacontenedores.

La reducción del tiempo de espera puede mejorarse mediante políticas portuarias de servicios alternativos. Normalmente, los buques atracan por orden de arribo, lo que aumenta el TAT total. Los puertos marítimos pueden facilitar la reserva de atraque antes del arribo, es decir, un amarre garantizado al arribo «Berth on Arrival», (BOA) y reserva mediante previa cita (Pivetta, C., et al, 2024, examinaron las emisiones y el consumo de combustible de dichas políticas). De igual manera, la reducción del TAT se puede lograr mediante el intercambio de información (tecnologías de la información y la comunicación (TIC)), intercambio electrónico de datos (EDI), ventanilla única, sistema comunitario portuario y gestión del tráfico marítimo, además de agilizar el despacho de buques y estandarizar documentos.

Asignación de Atracaderos-Asignación y Programación de Patios. Los puertos marítimos pueden reducir el TAT de los buques portacontenedores optimizando sus operaciones empelando los siguientes modelos de simulación (Lun, Y.H.V., et al, 2023): Problema de Asignación de Atraques «Berth Allocation Problem», (BAP), que planifica el tiempo de atraque de estos y el espacio de los muelles con antelación; Problema de Asignación de Grúa de Muelle «Quay Crane Assignment Problem», (QCAP), que determina el número de grúas para un buque; Problema de Programación de Grúa de Muelle «Quay Crane Scheduling Problem», (QCSP) para el horario de trabajo de las grúas, para la asignación y programación patio CHE.

Sistemas Automatizado de Amarre «Automated Mooring Systems», (AMS). Estudios recientes indican que los buques ganan 1,5 horas con el proceso de amarre automatizado, lo que reduce tiempo de operación de atraque a sólo unos pocos segundos. En consecuencia, reduce el TAT (Lun, Y.H.V., et al, 2023). El sistema utiliza ventosas (sistemas magnéticos o de vacío) controladas remotamente y accionadas hidráulicamente. Cuando el buque se acerca al atracadero, las plataformas se adhieren al cuerpo a baja velocidad y luego lo succionan hacia el muelle. Luego, el buque se fija al muelle, monitoreando constantemente la eficiencia del vacío/imanes, notificando a la tripulación en caso de averías o errores. La instalación de amarre automatizado AMS se considera costosa, pero promete altos retornos en el uso de mano de obra y el impacto ambiental; Se estima la reducción de CO₂ en alrededor del 76 % en comparación con el método convencional. Normalmente, para el amarre tradicional, los buques utilizan la energía de los motores, lo que implica el uso de combustible, mientras que el amarre automatizado ahorra consumo.

Arribo «Virtual Virtual Arrival», (VA)-Atraque Justo A Tiempo, (JAT). Los puertos al aprovechar el potencial del VA y reunir a todas las partes interesadas facilitan el intercambio de información (Lun, Y.H.V., et al, 2023). Esta medida mejora el atraque JAT, la reducción de la velocidad de los buques y la navegación lenta, genera hasta 27 % de ahorro en el consumo de combustible.

Reducción Velocidad del Buque «Vessel Speed Reduction», (VSR). Los puertos al gestionar e incentivar la VSR, donde los buques reducen la velocidad al acercarse a los puertos, reduce el consumo de combustible y, por tanto, las emisiones GEI (Alamouh, A.S., et al, 2023; Chunlai Yu, Haolun Ding, Hao Zhu, Jinda Zhu, Yancheng Liu, Siyuan Liu, Qinjin Zhang & Haohao Guo, 2024:). La VSR puede reducir las emisiones de CO₂ entre un 8 % y un 20 %. Los buques pueden hacerlo voluntaria u obligatoriamente a 10-12 nudos. Reducir la velocidad un 10 % disminuye el consumo de combustible en entre un 15 % y un 20 %, y una reducción del 20 % disminuye el consumo de combustible en un 40 % y el CO₂ en un 7%. Investigaciones recientes revelan que reducir la velocidad en vías navegables de 24 a 8 nudos reduce el CO₂ en un 48 %. Combinando VSR con OPS, las emisiones de los buques se pueden reducir entre un 71 % y un 91 % dentro del puerto.

Casco-Hélice. Dispositivos de ahorro de energía, estabilizadores, timón «becker», proa bulbosa, revestimiento de casco, robots de limpieza de casco «grooming», modificación de la hélice, electrificación de la propulsión mediante un sistema de propulsión «pod», técnicas de seguimiento del rendimiento del casco, lubricación por aire. Estudio revelan que el uso de energía por tonelada-milla disminuirá entre un 35 % y un 40 % en promedio para 2050 en todas las rutas marítimas proyectadas (Iris, Çağatay, et al, 2019), debido a la aplicación de medidas de eficiencia energética, mejoras en el casco-hélice, maquinaria y reducción de velocidad.

Servicios Misceláneos. Los puertos pueden ofrecer otras medidas que contribuyan a la eficiencia operativa y energética de los buques: sistemas de transporte respetuosos con el medio ambiente, limpieza de casco y pulido de hélices, uso de compresores para limpiar el hielo de los muelles, bombas de electricidad en tierra para líquidos a granel.

Integración de la Ciudad Portuaria. El puerto puede cooperar con la ciudad para lograr diversas medidas de mitigación climática (González-Laxe, F., Picatoste, X., López-Arranz, A., 2023), a través de la economía circular, desarrollando interacciones entre la ciudad y la industria en la gestión de residuos, con los procesos de reciclaje y reutilización de calor, vapor y CO₂.

Corredores Marítimos Verdes (CMV). El objetivo principal es catalizar la transición energética mediante el desarrollo de corredores marítimos verdes (CMV). Estos corredores consisten en una red de puertos y rutas marítimas dedicadas al uso de combustibles alternativos, como el "Bunker Green", caracterizados por bajas o nulas emisiones de carbono. En este sistema, los participantes comparten los costos y beneficios asociados al empleo de estos combustibles, lo que incentiva su adopción.

Además de reducir de manera inmediata las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), los CMV impulsan el desarrollo regulatorio y fomentan la inversión en embarcaciones, infraestructura y producción de "Bunker Green", al proporcionar una mayor certeza sobre la demanda (Ghosh, B., 2024; Pivetta, D.C., et al., 2024; Dere, C., 2023a; Dere, C., 2023b; Zhou, E., et al., 2023; Gan, S., 2022; Inal, O.B., et al., 2022; Pellegrini, L.A., et al., 2024). Una vez establecida la infraestructura necesaria para los CMV, esta puede extenderse a rutas adyacentes, acelerando la descarbonización más allá del corredor inicial.

La Organización Marítima Internacional (OMI) ha definido un marco ambicioso para estos corredores verdes, estableciendo como meta que, para 2030, al menos el 5% de la energía utilizada en el transporte marítimo internacional provenga de tecnologías, combustibles y/o fuentes de energía con emisiones nulas o casi nulas de GEI, con el objetivo aspiracional de alcanzar el 10%.

Transición Energética

Los puertos marítimos no son sólo un nodo digital y de transporte, por el contrario, se están convirtiendo cada vez más en centros energéticos en el ecosistema energético global. En promedio, el 40% de las mercancías que pasan por los puertos están relacionadas con la energía. Los «Clusters» industriales se ubican regularmente en los puertos y sus alrededores, lo que apunta a posibles sinergias y oportunidades de cocreación (Anas S. Alamoush, et al, 2024; D. Pivetta, C., et al, 2024; Lun, Y.H.V., et al, 2023). Los puertos marítimos son nodos centrales para el acoplamiento sectorial y la integración de sistemas energéticos, ya que albergan y prestan servicios a múltiples industrias, incluidas las de petróleo y gas, transporte marítimo, transporte por carretera, ferrocarriles, turismo de cruceros, manufactura y suministro de energía eólica marina.

La producción y distribución de energía es el corazón de la descarbonización y la transición energética. La descarbonización del transporte requiere que todas las partes interesadas se alineen, incluso colaboren y tomen medidas. La reducción de las emisiones de GEI requiere activar variedad de facilitadores de la descarbonización en la Cadena Global de Valor (CGV) (Alamoush, A.S., et al, 2023; Alves De Moura, D. & Botter, R.C., 2020). De hecho, los puertos marítimos desempeñan papel importante en la transición energética; en la sincronización a lo largo de la CGV del transporte al ayudar a la fluidez del flujo de mercancías al reducir los tiempos de espera/inactividad, los costos y las emisiones de GEI.

La sincronización requiere el intercambio de datos, digitalización de extremo a extremo a gran escala, así como la adopción de todos los facilitadores disponibles y relevantes de la descarbonización. Los puertos deben ser proactivos si quieren contribuir a un ecosistema de transporte sostenible para aprovechar las oportunidades que presenta la transición. Necesitan medir y cuantificar la eficiencia energética para apoyar las decisiones sobre estrategias energéticas y reducir eficazmente el consumo de energía. Los puertos pueden generar nuevas ganancias por arrendamiento o ingresos mediante la venta de energía.

Dicha estrategia energética debería abarcar todas las operaciones y servicios portuarios como guía para toda la comunidad portuaria, incluidos los clientes que utilizan los puertos como nodos de transporte, digitales y energéticos (Alves De Moura, et al, 2020; D. Pivetta, C., et al, 2024; Lun, Y.H.V., et al, 2023). Esto implica que la misma influya, en diversos grados, en las estrategias de los actores que operan dentro del puerto y aquellos que lo visitan, incluidos los operadores de terminales, las compañías navieras y los operadores terrestres de camiones/trenes, así como propietarios beneficiarios de carga. De hecho, todas las decisiones de inversión y asociación relacionadas con los puertos y la energía deben respaldar el interés mutuo y estar alineadas con la estrategia general de la administración portuaria. Para tal, los puertos deben evaluar sus necesidades energéticas actuales y las emisiones CO₂ de sus propios activos y operaciones dentro del área portuaria. Esto, con el propósito de desarrollar medidas para reducción de la huella de carbono en la zona portuaria.

Una de las medidas para que los puertos marítimos mejoren la eficiencia energética y garanticen que sus propias necesidades dentro del área portuaria se satisfagan de manera sostenible es el cambio de los combustibles fósiles a soluciones energéticas sostenibles (combustibles alternativos; electricidad verde generada a partir de fuentes renovables). Electrificación baja en carbono para grúas, apiladores retráctiles, motores primarios, remolcadores, carretillas elevadoras y la flota de vehículos del puerto contribuye a una reducción de la huella de carbono. A nivel mundial, algunos puertos marítimos instalan iluminación LED e inteligente en las instalaciones y dentro de la zona portuaria. Los puertos

pueden adquirir electricidad verde de empresas energéticas y, alternativamente, producir su propia energía renovable mediante inversiones en energía solar y eólica (Biswajit Ghosh, 2024; D. Pivetta, C., et al, 2024; Dere, C., 2023a; Dere, C., 2023b; Enjiang Zhou, et al, 2023; Gan, S., 2022; Inal, O.B., et al, 2022; Pellegrini, L.A. et al, 2024). La adopción de tales medidas resulta en ahorros sustanciales de gastos operativos, incluida la reducción de las emisiones de CO₂ y una menor contaminación acústica, lo que contribuye a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de las Naciones Unidas.

La mayoría de los puertos marítimos se integran de múltiples operadores, arrendamientos y terminales independientes dentro de su área portuaria (Ju, H., et al, 2024; Lun, Y.H.V., et al, 2023). Al crear o aprovechar, junto con otras partes interesadas, plataformas colaborativas, incentivos regulatorios y asociaciones, la administración (autoridad portuaria, gobernanza) logra mejorar la alineación-sincronización de los esfuerzos de descarbonización en múltiples áreas y cadenas de suministro (Alamouh, A.S., et al, 2023). Esto, con el objeto de lograr la reducción efectiva de GEI. Para tal, implementar hojas de ruta conjuntas con otros puertos, operadores y Proveedores de Servicios Logísticos (3-PL-4PL-5PL-6PL), establecer infraestructura planificando e invirtiendo en capacidad de red, y desarrollando procesos logístico-portuarios compartidos para una gestión eficiente del tráfico entre terminales y actores en la comunidad portuaria.

Un factor crítico de éxito para generar impulso en la colaboración con los numerosos actores portuarios independientes es la transparencia y el diálogo activo con la comunidad portuaria. Esto se puede lograr compartiendo digitalmente hojas de ruta, medidas y actividades actualizadas entre los actores. Invitar a los actores portuarios a compartir una visión conjunta o una imagen objetivo conjunta para el puerto con emisiones netas de carbono cero o climáticamente neutral es una herramienta, a futuro, de potencial valor.

En la transición energética, los puertos marítimos suministrarán y facilitarán energía sostenible para los transportistas (marítimos y terrestres) que operan a través de sus puertos (Anas S. Alamouh, et al, 2024; Lun, Y.H.V., et al, 2023). Para ello, necesitarán desarrollar capacidades apropiadas. La administración portuaria (autoridad portuaria, gobernanza) facilitará el abastecimiento de combustibles alternativos (amoníaco verde, hidrógeno verde, metanol verde) y ofrecer electricidad verde en tierra a los buques mientras están atracados. De igual manera, proporcionar estaciones de carga y estaciones de combustible alternativo (biogás licuado, hidrógeno verde) para vehículos pesados de carga que transportan mercancías hacia y desde los puertos, y electrificación del ferrocarril con electricidad sin emisiones de carbono o con bajas emisiones de carbono.

De hecho, la economía de escala desempeña un papel clave en la eficiencia energética, ya que los terminales que realizan menos de 100.000 movimientos de contenedores al año consumen más del doble del diésel por contenedor que los terminales con más de 500.000 movimientos (Gan, S., 2022). Los contenedores refrigerados consumen la mayor parte de la energía eléctrica y su eficiencia depende en gran medida de la infraestructura para transmitir energía a las terminales (Anas S. Alamouh, et al, 2024; Lun, Y.H.V., et al, 2023) y no de la eficiencia con la que la administración portuaria maneja este tipo de carga.

Así, varios estudios revelan que los equipos portuarios que más combustible consumen son las grúas de muelle (70 % del consumo total; Enjiang Zhou et al, 2023; Frauke Urban et al, 2024; Raza, Z., et al, 2023), y el transporte entre zonas portuarias (30 %; Enjiang Zhou et al, 2023; Frauke Urban et al, 2024; Raza, Z., et al, 2023). Desde el punto de vista eléctrico, las grúas de muelles y contenedores frigoríficos (43 y 37 %; Enjiang Zhou et al, 2023; Frauke Urban et al, 2024; Raza, Z., et al, 2023)

consumen la mayor parte de la energía, mientras que el resto (20 %; Enjiang Zhou et al, 2023; Frauke Urban et al, 2024; Raza, Z., et al, 2023) se utiliza en edificios administrativos.

Más allá del suministro de energía limpia, los puertos marítimos apoyan la transición energética y la descarbonización de los mismos con llegadas JAT y prácticas de gestión de franjas horarias, que logran tener impacto significativo en el nivel de emisiones en el área portuaria, incluidas los terminales. Esta reducción es significativa en todo el flujo logístico de carga de un extremo a otro (Anas S. Alamoush, et al, 2024; Lun, Y.H.V., et al, 2023).

Un paso importante es abordar activamente con los procesos de tráfico portuario (digitalización e intercambio de información), con el fin de permitir llegadas JAT. Esto incluye compartir marcas de tiempo estimadas y reales entre los actores portuarios y los buques. Trabajar deliberadamente con los procesos portuarios, como la gestión del tráfico, tiene el potencial de permitir ahorros de energía y reducciones de GEI en el flujo de carga de extremo a extremo, superando considerablemente los ahorros que se pueden lograr con medidas que solo afectan las emisiones dentro del área geográfica de la zona portuaria.

En efecto, los puertos marítimos facilitan la transición energética de múltiples maneras, incluyendo:

Como propietarios e inversores, pueden optimizar la planificación espacial con el objeto de garantizar que haya terrenos e infraestructura básica relevante disponibles para facilitar los proyectos energéticos.

Como “reguladores” (Alamoush, A.S., et al, 2023), la administración portuaria (autoridad portuaria, gobernanza) desarrolla y aprovecha tarifas e incentivos para apoyar medidas bajas o nulas en CO₂, mejorando los estándares ambientales y de seguridad para facilitar la producción, el almacenamiento, el abastecimiento y transporte de combustibles alternativos.

Los puertos marítimos pueden crear procesos, con apoyo digital, que ayuden a otras partes interesadas a ser más eficientes (energéticamente), independiente de cambiar a fuentes de energía bajas o nulas en carbono. A través de procesos eficientes y aplicaciones digitales y tecnológicas apropiadas, los puertos marítimos pueden ayudar a minimizar las emisiones de CO₂, directamente mediante el suministro de electricidad renovable (Biswajit Ghosh, 2024; D. Pivetta, C., et al, 2024; Dere, C., 2023a; Dere, C., 2023b; Enjiang Zhou, et al, 2023; Gan, S., 2022; Inal, O.B., et al, 2022; Pellegrini, L.A. et al, 2024); para contenedores refrigerados e indirectamente, garantizando que esos contenedores se conecten a tiempo para que sus embarques no se echen a perder.

Los puertos marítimos como “facilitadores/socios de colaboración” pueden iniciar colaboraciones, asociaciones y consorcios comerciales con un amplio espectro de actores involucrados en el ecosistema de transporte y energía para alinear los objetivos climáticos (Alves De Moura, et al, 2020), predecir las necesidades energéticas y desarrollar proyectos relacionados con la energía para la producción, almacenamiento y transporte de combustibles con bajas o nulas emisiones de CO₂.

Los puertos marítimos con potencial energético lograrán expandir la comunidad portuaria invitando a actores “Energéticos” y monitoreando/rastreando los flujos de generación/consumo de energía (Anas S. Alamoush, et al, 2024; Lun, Y.H.V., et al, 2023) a través de: (a) Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC):), Sistemas de Transporte Inteligentes (STI), Sistema de

Comunicación e Identificación de Vehículos, Sistema de Posición Global (SPG), Sistema de Información Geográfica (SIG), Telemática, Wi-Fi, Tecnología 5G (mayor capacidad y velocidad de datos, menor latencia, mayor conectividad de dispositivos, menores costos, calidad más consistente); (b) tecnologías disruptivas de la Industria 4.0 (Ju, H., Zeng & Q., Chu, X., 2024 Stahlbock, R., et al 2020): Blockchain, Vehículos Autónomos (VA), Vehículos Aéreos no Tripulados (Drones), Robots de Reparto, Gemelos Digitales, Inteligencia Artificial (IA), Aprendizaje Automático (AA), Internet de las Cosas (IoT), Internet de la Industria (IoTT), Internet Físico (IP), Internet de los Servicios (IoS), Realidad Aumentada, Realidad Virtual, Sistemas Ciberfísicos, Big-Data, Gamificación, Computación en la Nube Computación Cognitiva, Ciberseguridad, otras.

Descarbonización

Aunque la industria naviera se prepara para cumplir con las regulaciones internacionales de descarbonización, el papel de los puertos marítimos es crucial en este cambio de paradigma (Alamoush, A.S., et al., 2023; Alamoush, A.S., Olçer, A.I., & Ballini, F., 2022; Ateyah Alzahrani, Ioan Petri, Yacine Rezgui, Ali Ghoroghi, 2021).

Los puertos marítimos deben abordar sus emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), incluidas aquellas generadas por el transporte marítimo, en cumplimiento de los compromisos establecidos en el Acuerdo de París, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kioto. Asimismo, deben considerar las directrices de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, el Convenio Internacional para la Prevención de la Contaminación por los Buques (MARPOL) y la Estrategia de la Organización Marítima Internacional (OMI) sobre GEI.

En consecuencia, existe un marco normativo amplio y diverso para la reducción de emisiones de GEI, aplicable tanto al transporte marítimo como a las actividades portuarias. Este marco incluye regulaciones y políticas internacionales, supranacionales, regionales, nacionales y locales que deben ser consideradas e implementadas tanto por el público como por la administración portuaria (autoridades portuarias y gobernanza).

La administración portuaria, como reguladores, implementan dichas disposiciones promulgando regulaciones pertinentes, haciéndolas jurídicamente vinculantes y supervisando su cumplimiento. Las regulaciones internacionales que abordan las emisiones del transporte marítimo son multifacéticas (D. Pivetta, C., et al, 2024). Si bien la OMI regula las emisiones del transporte marítimo, incluidos los GEI, los estados rectores del puerto garantizan el cumplimiento de los buques ante las autoridades marítimas nacionales. De igual importancia, se han establecido varios marcos de políticas (iniciativas) para facilitar la reducción de las emisiones atmosféricas de los buques: Iniciativa Mundial Portuaria sobre el Clima, EcoPorts de la Organización Europea de Puertos Marítimos y el Programa Mundial de Sostenibilidad Portuaria.

Si bien los buques implementan medidas técnicas y operativas para disminuir su huella de carbono, las regulaciones para reducir las emisiones del transporte marítimo, específicamente los GEI, son fundamentales para internalizar el costo de dichas emisiones (Alamoush, A.S., Olçer, et al, 2022; Alves De Moura, et al, 2020). La utilización de diferentes medidas, incluida la implementación de regulaciones, reduciría las emisiones de GEI hasta en un 75 % para 2050 (OMI) y, por tanto, los buques podrían cumplir los objetivos de la estrategia inicial de GEI de la OMI. Si bien los puertos marítimos son fundamentales en la aplicación e implementación de las regulaciones, la cultura geopolítica de la

administración portuaria influye en la implementación de las regulaciones.

En efecto, el poder regulatorio de la autoridad portuaria es diferente de un puerto a otro y su poder discrecional ambiental tiene límites. De hecho, los puertos de Europa están a la vanguardia en la implementación en comparación con los puertos no descentralizados de Asia y África (Alamouh, A.S., et al, 2023; Alamouh, A.S., Olçer, et al, 2022; Alves De Moura, et al, 2020). En consecuencia, cuando los puertos promulgan regulaciones locales más estrictas, esto puede tener un impacto en la competencia portuaria; por tanto, la regulación uniforme es más eficaz que la regulación unilateral, y debido a los problemas y variaciones antes mencionados en los modelos de negocios y la administración portuaria, es necesario otro enfoque administrativo como lo son los incentivos. De hecho, el tipo de incentivos iniciados por la industria marítimo-portuaria se basan principalmente en índices ambientales que contribuyen a la reducción de las emisiones de GEI (de Vries, A., Werner, G., Wijnhuizen, E., Toom, V., Bovens, M. & Hulscher, S., 2024; Elkafas, A.G., & Seddiek, I.S., 2024):

Índice Ambiental de Buques (IAB). El IAB fue iniciado por la Iniciativa Mundial Portuaria sobre el Clima y la Organización Internacional de Puertos. Los puertos pueden registrarse como proveedores de incentivos para los buques que hayan sido certificados registrando su consumo de combustible y emisiones al aire. Por tanto, el índice tiene una puntuación que va de 0 a 100. Según la puntuación, los puertos ofrecen incentivos como reducciones porcentuales de las tasas portuarias, aunque los cálculos porcentuales difieren de un puerto a otro.

Premio Verde (PV). Es una iniciativa privada que se estableció en Rotterdam para promover incentivos, la seguridad del transporte marítimo y la protección del medio ambiente en los Países Bajos y más allá. En particular, el PV involucra la seguridad y el desempeño ambiental de los buques petroleros, químicos y graneleros. Los buques limpios y seguros se certifican cuando van más allá de las regulaciones y estándares internacionales vigentes (Alamouh, A.S., Olçer, et al, 2022, Alves De Moura, et al, 2020). En términos de contaminación del aire, los armadores deben hacer un inventario del nivel actual de emisiones de sus buques y luego demostrar que han implementado medidas para disminuir ese nivel. Son pocos los puertos del mundo que ofrecen incentivos basados en el Acuerdo General

Índice de Envío Limpio (IEL). Fundado por autoridades públicas y dirigido por partes interesadas del transporte marítimo (organización sin fines de lucro) en Gotemburgo, Suecia, además de importadores y exportadores de carga. El IEL lo utilizan a menudo los transportistas que pueden comparar la eficiencia del combustible de sus transportistas de carga. De este modo, el IEL reduce la huella ambiental de las cadenas de suministro de importadores y exportadores (Alamouh, A.S., Olçer, et al, 2022; Alves De Moura, et al, 2020; de Vries, A., et al, 2024; Elkafas, A.G., et al, 2024). En menor medida, los puertos utilizan IEL. El índice es una herramienta abierta en línea que califica los buques y las empresas navieras según criterios ambientales con certificación (de una a cinco estrellas); a favor de derechos portuarios diferenciados desde el punto de vista medioambiental.

Calificación de Emisiones de GEI (CE GEI): es una iniciativa lanzada por Carbon War Room, una organización sin fines de lucro con sede en EE. UU., en cooperación con RightShip. RightShip es una empresa de investigación de antecedentes independiente que proporciona información en línea sobre el diseño de los buques y la eficiencia energética y clasifica los buques oceánicos en términos de clasificación de emisiones de GEI. La calificación varía desde A como el mejor hasta G como el menos eficiente, según el índice de diseño de embarcaciones existente.

Programa Medioambiental Green Marine (GM): un programa de certificación medioambiental para la industria marina norteamericana (EE.UU. y Canadá). Este esquema de ecoetiquetado certifica a los buques, puertos, terminales y astilleros que cada año logran un mejor desempeño ambiental en relación con la reducción de emisiones al aire (contaminantes del aire y GEI), la contaminación del agua, el ruido e indicadores de desechos/basuras (Alamoush, A.S., Olçer, et al, 2022; Alves De Moura, et al, 2020). Las reducciones de GEI del transporte marítimo se pueden calificar según criterios de cinco niveles. El criterio más alto, el criterio cinco, se alcanza cuando la reducción media anual de la intensidad de GEI alcanza una reducción del 2% en comparación con 2008.

Así, la adopción de los esquemas de incentivos por parte de los puertos, como proveedores de incentivos, y el número de buques certificados, son muy limitados en comparación con el número total de buques y puertos en el mundo. En 2017, 28 de los 100 principales puertos del mundo, en términos de volumen total de carga (Toneladas Métricas) y volúmenes de contenedores (TEU) manejados, emplearon incentivos financieros para descarbonizar el transporte marítimo. Algunos de los puertos más pequeños de la Unión Europea también aplican estos incentivos (Arnone, M. & Crovella, T. (2023; Alves De Moura, et al, 2020; de Vries, A., et al, 2024; Elkafas, A.G., et al, 2024). De igual manera, el número de buques certificados que califican para recibir incentivos también es bajo, lo que es resultado de problemas asociados con puntajes bajos. No obstante, si bien muchos buques no pueden cumplir con los requisitos de los programas de incentivos, las administraciones portuarias aún pueden utilizar los incentivos como programas de marketing y una herramienta para aumentar la conciencia ambiental del transporte marítimo.

En consecuencia, la descarbonización portuaria va a depender de pioneros, seguido de una rápida adopción por parte del resto de la misma (Alamoush, A.S., Olçer, et al, 2022). La industria marítimo-portuaria es variada y compleja, y la implementación de soluciones de descarbonización será un gran desafío. En primer lugar, los combustibles alternativos aún no están ampliamente disponibles; se espera que los suministros estén dispersos a nivel mundial y difieran en disponibilidad, escala y precio en las próximas décadas. Esto deja a las partes interesadas de toda la industria inseguras sobre en qué combustibles invertir (Biswajit Ghosh, 2024; Dere, C., 2023a; Dere, C., 2023b; Enjiang Zhou, et al, 2023; Gan, S., 2022; Inal, O.B., et al, 2022; Pellegrini, L.A. et al, 2024). En segundo lugar, la introducción de combustibles alternativos requerirá cooperación en toda la Cadena Global de Valor, con productores de combustible, armadores, aseguradoras, navieras, puertos y propietarios, operadores de embarcaciones trabajando colaborativamente en un nuevo paradigma para la industria marítimo-portuaria.

Comentarios

Los puertos marítimos, aunque contaminan considerablemente menos que los buques, se están convirtiendo en un desafío en tiempos de globalización y expansión urbana. Además de contribuir a la economía global como importantes centros de la Cadena Global de Suministro y la Cadena Global de Valor, generan alto impacto ambiental debido a las actividades y servicios relacionados con la carga; operaciones que impactan negativamente en la calidad del aire, el agua, el suelo, el nivel de ruido y la vida urbana en el entorno local. En consecuencia, atraviesan importantes desafíos debido a la globalización y al aumento del volumen de negocios. Obligando a la administración portuaria y a los operadores de los terminales a trabajar en la ampliación de áreas, modernización de equipos y cumplir con las nuevas normas en materia de Cambio Climático Global y transición energética.

El puerto marítimo, es el “Corazón de la Transición Energética”, ya que tiene el doble beneficio medioambiental y económico, a través de un considerable ahorro energético, dado que en la transición existen varias opciones energéticas hacia un consumo y producción más sostenible en los puertos. Desde las tecnologías de generación solar y eólica (en tierra y mar), pasando por el hidrógeno verde (H₂), la biomasa, la energía de las olas y la generación de electricidad de costa a buque, hasta el desarrollo de comunidades de energías renovables.

De los puertos marítimos se esperan cambios importantes camino hacia la transición energética, es decir, la transformación de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía para limitar el Cambio Climático Global. Las emisiones GEI, junto con la ciberseguridad, se están convirtiendo en los nuevos y grandes retos de la industria portuaria. Sin embargo, la transición hacia fuentes de energía renovables y más eficientes no es la prioridad, lo es, y lo seguirá siendo la rentabilidad. La transición energética, que poco a poco se está convirtiendo en una tendencia, posee una variedad de oportunidades de negocio y una posibilidad alejada del modelo de negocio tradicional basado en el volumen, como el desarrollo de «Clusters».

A menudo se pasa por alto la complejidad de la transición energética para los puertos marítimos porque implica una estrategia de gestión totalmente nueva e integrada: (1) cambio hacia fuentes de energía alternativas y/o renovables, por tanto, construcción de infraestructura específica y participación en diferentes mercados; (2) establecimiento de una nueva red, planes de inversión contables y estrategia de recuperación de la inversión; (3) apoyo de las autoridades regionales con regulación de políticas. Cualquier transición hacia fuentes alternativas de energía renovables es compleja. Además, la administración portuaria, por lo general, no puede influir directamente en los terminales cuando se trata de mejoras de infraestructura.

Los puertos marítimos pueden ofrecer incentivos y subvenciones a quienes no contaminan, en un intento de compensar el costo de la adopción de diversas tecnologías y medidas (descuentos en las tasas portuarias). También ofrecer recompensas (no monetarias), como políticas de asignación de plazas verdes. Teniendo en cuenta los desincentivos, los puertos marítimos pueden cambiar las tarifas o derechos portuarios aplicados a los buques contaminantes. De manera similar, los puertos podrían participar en futuras medidas basadas en el mercado, que son necesarias para abordar el impacto ambiental del transporte marítimo. Las medidas son sistemas de comercio de emisiones GEI (límite de emisiones) o impuestos sobre los combustibles fósiles. Además, los puertos pueden firmar acuerdos voluntarios con buques contaminantes para reducir sus emisiones GEI dentro de las áreas portuarias (reducir la velocidad antes de ingresar al puerto). De igual manera, pueden firmar acuerdos obligatorios con los arrendatarios y operadores portuarios, como en los requisitos de concesiones y licencias para operar, dentro de los cuales incluyen términos para adoptar medidas para reducir los GEI; la colaboración con sectores adyacentes es imprescindible.

Conclusiones

La Organización Marítima Internacional (OMI) ha adoptado una estrategia de reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que busca descarbonizar los buques para el año 2050 o en fechas cercanas. Este objetivo ambicioso requiere esfuerzos sin precedentes y acciones urgentes por parte de los puertos marítimos para satisfacer las necesidades de la industria, proporcionando instalaciones de abastecimiento de combustibles alternativos como hidrógeno verde (H₂), metanol, amoníaco y biocombustibles.

Los puertos tienen la capacidad de consolidarse como centros energéticos no solo para las operaciones marítimas y fluviales, sino también para el interior del continente. En este contexto, la transición energética no es opcional, sino un camino inevitable que los puertos marítimos deben recorrer.

La transición energética en los puertos marítimos es un motor crucial para mitigar el Cambio Climático Global. Este proceso implica transformar a los puertos de grandes consumidores de energía dependientes de combustibles fósiles a consumidores eficientes de combustibles verdes y energías renovables. Al mismo tiempo, los puertos deben evolucionar para convertirse en centros energéticos capaces de producir, almacenar, suministrar y distribuir combustibles alternativos, tanto para alimentar sus propios equipos como para abastecer de combustibles verdes («Bunker Green») a los buques.

Esta transformación tiene como objetivo facilitar la transición energética en la Cadena Logística Global de Transporte, la Cadena Global de Suministro y, en última instancia, en la Cadena Global de Valor, promoviendo así un desarrollo sostenible a nivel global.

Un puerto marítimo moderno no es solo un nodo digital para el transporte intermodal, sino también un núcleo central para el acoplamiento sectorial y la integración de sistemas energéticos. Además, es un elemento clave de la economía global, con un impacto significativo en las condiciones ambientales y el entorno social de la región donde se ubica.

Un puerto marítimo moderno debe cumplir con los requisitos ambientales actuales, convirtiéndose en un “Puerto Cero Emisiones”, lo que lo posiciona como el “Corazón de la Transición Energética”. Este concepto implica la implementación de un sistema inteligente de suministro energético que permita tanto el consumo como la distribución de energía proveniente exclusivamente de fuentes renovables, amigables con el medio ambiente y libres de emisiones de GEI.

Este enfoque no solo transforma los puertos en actores clave de la sostenibilidad global, sino que también redefine su rol como impulsores de la economía verde y el desarrollo sostenible.

Declaración sobre conflicto de interés

El autor del presente documento manifiesta ser independiente con respecto a instituciones financiadoras y de apoyo, y que durante la redacción del manuscrito no han recibido ningún tipo de financiamiento y no han incidido intereses o valores distintos a los que usualmente tiene la investigación. De igual manera, el autor declara que no tiene ningún conflicto de interés sobre el artículo.

Referencias Bibliográficas

- Akyar, D.A., & Ceylan, B.O., Celik, M.S. (2023). A Comprehensive Review on Sustainability and Energy Management of Seaports. In: Sogut, M.Z., Karakoc, T.H., Secgin, O., Dalkiran, A. (eds) Proceedings of the 2022 International Symposium on Energy Management and Sustainability . ISEMAS 2022. Springer Proceedings in Energy. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30171-1_27
- Alamouh, A.S., Dalaklis, D., Ballini, F., & Olcer, A.I. (2023). Consolidating Port Decarbonisation Implementation: Concept, Pathways, Barriers, Solutions and Opportunities. Sustainability 15. <https://doi.org/10.3390/su151914185>
- Alamouh, A.S., Olçer, A.I., & Ballini, F. (2022). Ports' Role in Shipping Decarbonisation: A Common Port Incentive Scheme For Shipping Greenhouse Gas Emissions Reduction. Clean. Logist. Supply Chain 3, 100021. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2021.100021>
- Alves De Moura, D. & Botter, R.C. (2020). Essential Factors for the Implementation of Sustainable Port Logistics Operations. In: Carreño Moreno, V., Vega Saenz, A., Carral Couce, L., Saravia Arenas, J. (eds) Proceeding of the VI International Ship Design & Naval Engineering Congress (CIDIN) and XXVI Pan-American Congress of Naval Engineering, Maritime Transportation and Port Engineering (COPINAVAL). CIDIN COPINAVAL 2019 2019. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35963-8_36
- Anas S. Alamouh, Fabio Ballini & Aykut I. Ölçer. (2024). Management of Stakeholders Engaged In Port Energy Transition, Energy Policy, Volume 188, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2024.114074>
- Arone, M. & Crovella, T. (2023). The Role of Green Finance in Supporting Maritime Sustainable Development. In: Walker, T., Turtle, H.J., Kooli, M., Nikbakht, E. (eds) Fintech and Sustainability. Palgrave Macmillan, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40647-8_4
- Ateyah Alzahrani, Ioan Petri, Yacine Rezgui, Ali Ghoroghi. (2021). Decarbonisation of Seaports: A Review and Directions for Future Research, Energy Strategy Reviews, Volume 38, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100727>
- Biswajit Ghosh. (2024). Potential of Hydrogen in Powering Mobility and Grid Sectors, Towards Hydrogen Infrastructure, Elsevier, Pages 349-376, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95553-9.00063-7>
- Brundu, B. & Carboni, S. (2024). Cold Ironing: An Analysis of Policies and Its Implementation in Europe with a Focus on the Italian Context and the Future Prospects in Sardinia. In: Gervasi, O., Murgante, B., Garau, C., Taniar, D., C. Rocha, A.M.A., Faginas Lago, M.N. (eds) Computational Science and Its Applications – ICCSA 2024 Workshops. ICCSA 2024. Lecture Notes in Computer Science, vol 14823. Springer, Cham.

https://doi.org/10.1007/978-3-031-65329-2_20

Cardoso, A., Robaina, M. & Matias, J. (2023). Research on Potential Usage of Residual Biomass in Marine Ports. In: Gonçalves dos Reis, J.C., Mendonça Freires, F.G., Vieira Junior, M. (eds) Industrial Engineering and Operations Management. IJCIEOM 2023. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, vol 431. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47058-5_8

Chunlai Yu, Haolun Ding, Hao Zhu, Jinda Zhu, Yancheng Liu, Siyuan Liu, Qinjin Zhang & Haohao Guo. (2024). Overview of Ship Shore Power Automation Docking Methods. In: Cai, C., Qu, X., Mai, R., Zhang, P., Chai, W., Wu, S. (eds) The Proceedings of 2023 International Conference on Wireless Power Transfer (ICWPT2023). ICWPT 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 1158. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0873-4_35

Czermański, E. & Cirella, G.T. (2022). Energy Transition in Maritime Transport: Solutions and Costs. In: Cirella, G.T. (eds) Human Settlements. Advances in 21st Century Human Settlements. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4031-5_5

D. Pivetta, C. Dall'Armi, P. Sandrin, M. Bogar & R. Tacani. (2024). The Role of Hydrogen as Enabler of Industrial Port Area Decarbonization, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 189, Part B, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113912>

de Vries, A., Werner, G., Wijnhuizen, E., Toom, V., Bovens, M. & Hulscher, S. (2024). Energy Transition Subsidies. In: Justice in Climate Policy. Research for Policy. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59427-4_4

Dere, C. (2023a). Hydrogen as a Transition Fuel in Marine Engines. In: Sogut, M.Z., Karakoc, T.H., Secgin, O., Dalkiran, A. (eds) Proceedings of the 2022 International Symposium on Energy Management and Sustainability. ISEMAS 2022. Springer Proceedings in Energy. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30171-1_58

Dere, C. (2023b). Hydrogen Fueled Engine Technology, Adaptation, and Application for Marine Engines. In: Zincir, B., Shukla, P.C., Agarwal, A.K. (eds) Decarbonization of Maritime Transport. Energy, Environment, and Sustainability. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-1677-1_4

Elkafas, A.G., & Seddiek, I.S. (2024). Techno-Economic and Environmental Analysis for the Application of Renewable Energy Sources in Seaports. Environ Sci Pollut Res 31, 37862–37876 <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33816-7>

Enjiang Zhou, Xiao Liu, Zhihang Meng, Song Yu, Jinxiu Mei & Qiang Qu. (2023). Hydropower Station Scheduling With Ship Arrival Prediction and Energy Storage. Sci Rep 13, 18969 <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45995-3>

- Frauke Urban, Anissa Nurdiawati & Fumi Harahap. (2024). Sector Coupling for Decarbonization and Sustainable Energy Transitions in Maritime Shipping In Sweden, *Energy Research & Social Science*, Volume 107, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103366>
- Gan, S. (2022). Alternative Fuel for Ship Propulsion. In: Cui, W., Fu, S., Hu, Z. (eds) *Encyclopedia of Ocean Engineering*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6946-8_249
- González-Laxe, F., Picatoste, X., López-Arranz, A. (2023). Challenges for Port Cities in the New Geopolitical Scenario. In: Leal Filho, W., Dinis, M.A.P., Moggi, S., Price, E., Hope, A. (eds) *SDGs in the European Region. Implementing the UN Sustainable Development Goals – Regional Perspectives*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17461-2_86
- Inal, O.B., Zincir, B. & Dere, C. (2022). Hydrogen as Maritime Transportation Fuel: A Pathway for Decarbonization. In: Agarwal, A.K., Valera, H. (eds) *Greener and Scalable E-fuels for Decarbonization of Transport. Energy, Environment, and Sustainability*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8344-2_4
- Innes, A. & Monios, J. (2018). Identifying the Unique Challenges of Installing Cold Ironing at Small and Medium Ports -The Case of Aberdeen, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 62, Pages 298-313, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.02.004>
- Iris, Çağatay & Lam, Jasmine Siu Lee. (2019). A Review of Energy Efficiency in Ports: Operational Strategies, Technologies and Energy Management Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 112(C):170-182. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.069>
- Ju, H., Zeng & Q., Chu, X. (2024). Cooperative Investment Strategies of Ports and Shipping Companies In Blockchain Technology. *Oper Res Int J* 24, 32 <https://doi.org/10.1007/s12351-024-00839-4>
- Kumar, M., Sharma, S. (2024). Renewable Energy and Sustainable Transportation. In: Sobti, R.C. (eds) *Role of Science and Technology for Sustainable Future*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0710-2_22
- Strategies for Coordinated Environmental Governance of Port Groups Based on Green Technology. In: *The Sustainable Development of Port Group*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-2378-2_8
- Lun, Y.H.V., Lai, Kh., Cheng, T.C.E. & Yang, D. (2023). New Technology Development in the Shipping Industry. In: *Shipping and Logistics Management*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26090-2_17
- Magdy Tawfik, Ahmed S. Shehata, Amr Ali Hassan & Mohamed A. Kotb. (2023). Renewable Solar and Wind Energies On Buildings For Green Ports in Egypt. *Environ Sci Pollut Res* 30,

47602–47629 (2023).
<https://doi.org/10.1007/s11356-023-25403-z>

Mikael Lind, Sandra Haraldson, Jillian Carson-Jackson, Jan Gardeitchik, Sukhjith Singh, Phanthian Zuesongdham, Richard Morton, Stefan Pettersson, Oscar Pernia & Steen Erik Larsen. (2021). Ports as Multidimensional Hubs. In: Lind, M., Michaelides, M., Ward, R., Watson, R.T. (eds) Maritime Informatics. Progress in IS. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-72785-7_3

Mikael Lind, Sandra Haraldson, Wolfgang Lehmacher, Zeeshan Raza, Ellinor Forsström, Linda Astner, Jeremy B. Bentham, Xiuju Fu, Jimmy Suroto & Phanthian Zuesongdam. (2023). Towards Ports as Energy Nodes: Strengthening Micro Energy Systems. In: Lind, M., Lehmacher, W., Ward, R. (eds) Maritime Decarbonization. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-39936-7_25

Oleksiy Melnyk, Oleg Onishchenko, Svitlana Onyshchenko, Nadiia Yaremenko, Eduard Maliuha, Iryna Honcharuk & Oleksii Shamov (2024). Innovative Technologies for the Maritime Industry: Hydrogen Fuel as a Promising Direction. In: Boichenko, S., Zaporozhets, A., Yakovlieva, A., Shkilniuk, I. (eds) Modern Technologies in Energy and Transport. Studies in Systems, Decision and Control, vol 510. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_3

Otaki, T. & Shaw, R. (2024). Global Hydrogen Energy: Potentials and Challenges. In: Shaw, R., Silva, K.,

Chollacoop, N. (eds) Energy, Sustainability and Resilience. Disaster Risk Reduction. Springer, Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-97-4174-8_10

Peggy Shu-Ling Chen, Hongjun Fan, Hossein Enshaei, Wei Zhang, Wenming Shi, Nagi Abdussamie, Takashi Miwa, Zhuohua Qu & Zaili Yang. (2023). A Review on Ports' Readiness to Facilitate International Hydrogen Trade, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 48, Issue 46, Pages 17351-17369,
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.220>

Pellegrini, L.A., Spatolisano, E., Restelli, F., De Guido, G., de Angelis, A.R. & Lainati, A. (2024). Green H2: One of the Allies for Decarbonization. In: Green H2 Transport through LH2, NH3 and LOHC. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-66556-1_1

Ramos, S.J., & Yilmaz, U. (2023). Energy Transition and City–Port Symbiosis in Biomass Import–Export Regions. Marit Econ Logist 25, 406–428
<https://doi.org/10.1057/s41278-022-00238-6>

Ramsay, W., Fridell, E. & Michan, M. (2023). Maritime Energy Transition: Future Fuels and Future Emissions. J. Marine. Sci. Appl. 22, 681–692.
<https://doi.org/10.1007/s11804-023-00369-z>

Raza, Z., & Singh, S. (2023). Decarbonizing the Maritime Industry: Current Environmental Targets and Potential Outcomes. In: Lind, M., Lehmacher, W., Ward, R. (eds)

- Maritime Decarbonization. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39936-7_2
- Renken, K. & Petersen, M. (2023). How a Value Chain Approach Plays Out in Maritime Decarbonization. In: Lind, M., Lehmacher, W., Ward, R. (eds) Maritime Decarbonization. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39936-7_11
- Russo, F. & Musolino, G. (2024). Environmental Challenges and Measures in Ports. In: Ksibi, M., et al. Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions (4th Edition). EMCEI 2022. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-51904-8_203
- Santiago, J.I.P., Gutiérrez, D.D. & Fernández, R.P. (2024). Decarbonization Actions in the Cruise Sector. EUROMED Area. In: Carral, L., et al. Proceedings of the IV Iberoamerican Congress of Naval Engineering and 27th Pan-American Congress of Naval Engineering, Maritime Transportation and Port Engineering (COPINAVAL), COPINAVAL ICNE 2022 2023. Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping, vol 17. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-49799-5_64
- Stahlbock, R., Heilig, L., Cammin, P. & Voß, S. (2020). Blockchain in der Maritimen Logistik. In: Fill, HG., Meier, A. (eds), Blockchain. Edition HMD. Springer Vieweg, Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-28006-2_12
- Sugimura, Y. (2023). Relationship Between Port Governance and Climate Change Action. In: Climate Change Countermeasures in Ports Toward Carbon Neutrality. Sustainable Development Goals Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34394-0_2
- Tsiulin, S., & Reinau, K.H. (2023). How to Reduce Emissions in Maritime Ports? An Overview of Cargo Handling Innovations and Port Services. In: Arai, K. (eds) Intelligent Systems and Applications. Inte-IliSys 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 542. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16072-1_22
- Zhe Wang, Bo Dong, Jinjun Yin, Mingyu Li, Yulong Ji & Fenghui Han. (2024). Towards a Marine Green Power System Architecture: Integrating Hydrogen and Ammonia as Zero-Carbon Fuels for Sustainable Shipping, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 50, Part B, Pages 1069-1087, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.207>
- Zografakis, H., Henderson, N., Rigden Green, A., Mace-Kokota, D., & Turner KC, J.M. (2023). Decarbonize Shipping or Decarbonize International Maritime Trade: The Present Contractual Framework and the Need for a New Contractual Architecture. In: Lind, M., Lehmacher, W., Ward, R. (eds) Maritime De-carbonization. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39936-7_16
- Zubavichus, R. & Kharitonov, M. (2023). Energy Storage and Consumption

Management as Elements of the Green Port Concept. In: Kostrikova, N. (eds) Energy Ecosystems: Prospects and Challenges. EcoSystConfKlgut 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 626. Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-24820-7_5