

México: abasteciendo el futuro del transporte marítimo

El papel de México en la transformación del transporte marítimo mundial a través de combustibles verdes derivados del hidrógeno



Por Ricardo
Y el Fondo de Defensa del Medio Ambiente



Para la
Asociación de la P4G y la Getting to Zero Coalition





Índice

	Resumen ejecutivo	6
	Glosario	9
Introducción	Evaluación de los combustibles marítimos con cero emisiones de carbono para México	10
Sección 1	Este informe se centra en los combustibles marítimos con cero emisiones de carbono	13
Sección 2	Los combustibles marítimos con cero emisiones de carbono pueden utilizarse de forma segura con regulaciones y capacitación adecuadas	15
Sección 3	El mejor enfoque para la adopción de los combustibles marítimos con cero emisiones de carbono depende del mercado global, de los requisitos del buque y de la disponibilidad de recursos naturales	17
Sección 4	México está bien situado como uno de los principales centros de intercambio entre Norte y Sudamérica	20
Sección 5	México depende actualmente del gas importado de Norteamérica para producir electricidad, pero tiene objetivos ambiciosos para reducir las emisiones de carbono	22
Sección 6	México tiene un importante potencial renovable que podría abastecer su demanda de electricidad y más	24
Sección 7	La abundancia de potencial renovable de México lo sitúa en una posición fuerte para producir combustibles con cero emisiones de carbono	26
Sección 8	La adopción de los combustibles con cero emisiones de carbono puede traer otros beneficios	28
Conclusiones	Oportunidades para la economía y la sociedad	32
Casos de estudio	Casos de estudio de puertos en México	34
	Referencias	44
	Apéndices	48

Coalición Getting to Zero

Getting to Zero Coalition (la Coalición Llegando a Cero), una asociación entre el Global Maritime Forum, Friends of Ocean Action y el World Economic Forum, es una comunidad de partes interesadas ambiciosas de los sectores marítimo, energético, de infraestructuras y financiero, con el apoyo de gobiernos clave, organizaciones intergubernamentales y otras partes interesadas, que están comprometidas con la descarbonización del transporte marítimo.

La ambición de la Getting to Zero Coalition es tener naves eléctricas de bajo consumo comercialmente viables operando a lo largo de las rutas comerciales de altamar para 2030, con el apoyo de la infraestructura necesaria para las fuentes de energía de carbono cero escalables, incluyendo la producción, distribución, almacenamiento y abastecimiento de combustible.

Acerca de P4G

P4G (Partnering for Green Growth and the Global Goals 2030) es un mecanismo global pionero de asociaciones verdes para construir economías sostenibles y resilientes. P4G moviliza un ecosistema global de 12 países socios y 5 organizaciones asociadas para desbloquear las oportunidades de más de 50 asociaciones que trabajan en cinco áreas de los ODS: alimentación y agricultura, agua, energía, ciudades y economía circular.

Acerca del Global Maritime Forum

El Global Maritime Forum (Foro Marítimo Global) es una organización internacional sin ánimo de lucro dedicada a dar forma al futuro del comercio marítimo mundial para aumentar el desarrollo económico sostenible a largo plazo y el bienestar humano.

Acerca de Friends of Ocean Action

Friends of Ocean Action (Amigos de la Acción Oceánica) es un grupo único de más de 55 líderes mundiales de negocios, organizaciones internacionales, sociedad civil, ciencia y academia que están impulsando soluciones escalables para los desafíos más críticos que enfrenta el océano. El World Economic Forum, en colaboración con el World Resources Institute (Instituto de Recursos Mundiales), es su anfitrión.

Acerca del World Economic Forum

El World Economic Forum es la Organización Internacional para la Cooperación Público-Privada. El Foro reúne a los principales líderes políticos, empresariales, culturales y de otros ámbitos de la sociedad para dar forma a las agendas globales, regionales e industriales. Fue creado en 1971 como una fundación sin ánimo de lucro y tiene su sede en Ginebra, Suiza. Es independiente, imparcial y no está vinculado a ningún interés especial.

Acerca de Environmental Defense Fund

Environmental Defense Fund Europe (Fondo de Defensa Ambiental de Europa) es una filial de Environmental Defense Fund (Fondo de Defensa Ambiental, o EDF), una organización internacional sin ánimo de lucro líder que crea soluciones transformadoras para los problemas medioambientales más graves. Desde 1967, EDF ha utilizado la ciencia, la economía, el derecho y asociaciones innovadoras entre los sectores públicos y privados para dar una nueva voz a las soluciones prácticas.

Acerca del University College London

El University College London Energy Institute Shipping Group (el Grupo de Transporte Marítimo del Instituto de Energía del Colegio Universitario de Londres) tiene como objetivo acelerar la transición del transporte marítimo hacia un sistema energético equitativo y globalmente sostenible a través de la investigación, la educación y el apoyo a las políticas del transporte marítimo de categoría mundial. El grupo está especializado en la investigación multidisciplinar basada en el análisis de datos y la modelización avanzada del sector marítimo.

Acerca de la International Association of Ports

La International Association of Ports (Asociación Internacional de Puertos, oIAPH) se formó en 1955 y en los últimos sesenta años se ha convertido en una alianza mundial que representa a más de 180 puertos miembros y 140 empresas portuarias en 90 países. El objetivo principal de la IAPH gira en torno a la promoción de los intereses de los puertos en todo el mundo, la creación de relaciones sólidas entre los miembros y el intercambio de las mejores prácticas entre ellos.

Acerca de Ricardo

En Ricardo, nuestra visión es crear un mundo en el que todos podamos vivir de forma sostenible: respirando aire limpio, utilizando energía limpia, viajando de forma sostenible, accediendo a agua limpia y conservando los recursos. La adopción de combustibles marítimos con cero emisiones de carbono acercaría al mundo a estos ideales. Desde los años 50, Ricardo ha trabajado para conseguir mejoras en la calidad del aire y ha sido pionero en el uso de tecnologías de energías renovables. Actualmente trabajamos en la aplicación del Acuerdo de París sobre el cambio climático, ayudando a los países a realizar sus planes de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

ee.ricardo.com

Agradecimientos

Este informe ha sido redactado por Olivia Carpenter-Lomax, Guy Wilkinson y Víctor Martínez, de Ricardo Energy & Environment (Ricardo Energía y Medio Ambiente), con la ayuda de Jabulani Nyathi y Mohit Sharma. Fue encargado por Aoife O'Leary, Marie Cabbia Hubatova y Panos Spiliotis, de EDF Europe, y los autores agradecen sus aportaciones durante su elaboración. Los autores y EDF desean agradecer a Santiago Suárez de la Fuente, Wendela Schim Van Der Loeff del University College London (UCL) y a Camilo Velandia Perico y Carlo Raucci de University Maritime Advisory Services (UMAS) por su asesoramiento y los datos sobre la demanda de transporte marítimo que son fundamentales para el análisis de este informe.

Los autores también desean agradecer a las siguientes personas y organizaciones que han colaborado en la revisión del informe: Tristan Smith (UCL), Ingrid Sidenvall Jegou (Global Maritime Forum), Emma Skov Christiansen (World Economic Forum), Ned Molloy (Global Strategic Communications Council).

El Comité Directivo también aportó valiosas contribuciones a lo largo del proyecto: Abel López Dodero (Banco Mundial), Adela Olano Roche (CEMEX), Ana Lepure (Consultora México, Eficiencia Energética), Edna Rosas Huerta (Universidad Veracruzana, campus Veracruz, Departamento de Ingeniería Marina), Erick Rosas López y Claudia Alejandra Octaviano Villasana (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)), Gildardo Alarcón Daowz (Secretaría de Marina; Unidad de Capitanías de Puerto y Asuntos Marítimos (UNICAPAM-SEMAR)), Heberto Barrios Castillo (Dirección General de Asuntos Internacionales de la Secretaría de Energía (SENER)), Israel Hurtado (Asociación Mexicana de Hidrógeno), Jacobo Mekler Waisburd (Asociación Mexicana de Hidroelectricidad (AMEXHIDRO)), José Manuel Becerra Pérez (Comisión de Energía del Consejo Coordinador Empresarial), Lucia Shaw (Asuntos Internacionales y Relaciones Institucionales (Consejo Coordinador Empresarial)), Luis A. Sarrás (AES Sudamérica), Luisa Sierra (Iniciativa Climática de México), Marco Jano Ito (Centro Mario Molina de Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente), Nelson Mojarro (Gobierno Energía Limpia I+D), Norma Patricia Muñoz Sevilla (Centro Interdisciplinario de Investigación y Estudios en Medio Ambiente y Desarrollo), Ricardo Sánchez (Comisión Económica para América Latina y el Caribe de la ONU (CEPAL)), Sergio Silva Castañeda (Secretaría de Economía), Sheila Guadalupe Cadena Nieto y David Mora Fonz (Secretaría de Desarrollo Energético de Tabasco), Tomas Baeza y Antoine Millet (ENGIE).

Descargo de responsabilidad

Este informe se basa en el análisis realizado por Ricardo Energy & Environment para la Getting to Zero Coalition, una asociación entre el Global Maritime Forum, Friends of Ocean Action y el World Economic Forum. Las opiniones expresadas son exclusivamente de los autores y no de la Getting to Zero Coalition ni del Global Maritime Forum, Friends of Ocean Action o el World Economic Forum.

Resumen ejecutivo

Con un abundante potencial de energía renovable y acceso a rutas marítimas muy transitadas, México está perfectamente situado para construir un valioso sector de combustibles marítimos con cero emisiones de carbono. Esto incluye la producción de estos a partir de electricidad renovable, el suministro a las naves que visitan los puertos mexicanos y la posible exportación de los combustibles como un producto valioso en el mercado mundial. Este nuevo sector de combustibles con cero emisiones de carbono tendría beneficios más allá del transporte marítimo; también podría mejorar la seguridad energética aprovechando los recursos locales, ayudaría a catalizar la economía de bajo carbono en México apoyando la descarbonización de otros sectores y crearía una amplia gama de puestos de trabajo.

Hay varios combustibles con cero y bajas emisiones de carbono con potencial para ser utilizados en el transporte marítimo

Las opciones de combustibles con cero y bajas emisiones de carbono disponibles para su adopción por la industria marítima incluyen el hidrógeno verde y azul, el amoníaco verde y azul, el metanol verde, los biocombustibles y la energía de las baterías. Este estudio investiga las soluciones de propulsión más adecuadas para diferentes buques comerciales en función de una serie de criterios. La abundancia de recursos energéticos renovables en México hace que los combustibles para embarcaciones puedan derivarse de la generación de electricidad renovable. Este estudio ha identificado que las opciones más adecuadas para los puertos evaluados en México son el hidrógeno y el amoníaco para los grandes buques comerciales como los petroleros, los portacontenedores y los graneleros (e incluso los remolcadores); mientras que las naves pequeñas, como los de servicio portuario, pueden abastecerse mediante la electrificación.

La descarbonización del sector marítimo es complementaria a las ambiciones de México de reducir las emisiones de carbono

México tiene un abundante potencial de energía renovable, suficiente para abastecer su demanda eléctrica doméstica, así como la producción de combustibles con cero emisiones de carbono para abastecer a las naves comerciales que recargan combustible en sus puertos. México se ha comprometido a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 22% por debajo de la línea base al 2030 y en un 50% (en relación con el año 2000) para 2050. La adopción de combustibles con cero emisiones de carbono en su sector marítimo podría actuar como catalizador para alcanzar los compromisos generales del país en materia de carbono, desarrollando cadenas de suministro de generación renovable, habilidades y economías de escala que apoyen una mayor adopción de las tecnologías. Los combustibles también pueden utilizarse en industrias más amplias, como la producción de fertilizantes, amoníaco y acero para uso doméstico y exportación. Con una adecuada planificación energética, de inversión y medioambiental a nivel de toda la economía, el desarrollo del sector de los combustibles marítimos con cero emisiones de carbono y su infraestructura puede apoyar múltiples objetivos de descarbonización y aliviar los puntos débiles locales, como la seguridad energética. Las zonas con escasa seguridad energética y una gran dependencia de las importaciones de combustibles fósiles o de electricidad pueden beneficiarse enormemente de las energías renovables desplegadas localmente, que reducen esta dependencia de fuentes externas, y de la producción local de electrocombustibles que podrían almacenarse para su uso posterior, aumentando la seguridad del suministro. En el futuro, este tipo de ventajas podrían aprovecharse en zonas como Baja California, con posibles beneficios indirectos para el medio ambiente y las economías y comunidades locales.

Es seguro utilizar combustibles de transporte con cero emisiones de carbono con la normativa y la formación adecuadas

Algunos actores han planteado su preocupación por los riesgos para la salud, la seguridad y el medio ambiente de los combustibles con cero emisiones de carbono. Sin embargo, esto no debe considerarse una barrera importante para la adopción de estos combustibles; los combustibles que se utilizan hoy en día tienen importantes riesgos asociados, por lo que se han desarrollado códigos, mejores prácticas y normas a lo largo de años de experiencia que nos permiten utilizarlos de forma amplia y segura en una variedad de aplicaciones, entornos y condiciones. Los recientes desarrollos y proyectos relacionados con su transporte y almacenamiento también dibujan un panorama optimista sobre la posibilidad de manejar con seguridad grandes volúmenes de hidrógeno, aprovechando incluso la amplia infraestructura de tuberías presente en el país [1] [2]. Lo mismo puede hacerse con el hidrógeno y el amoníaco verdes. Estos combustibles tienen un conjunto diferente de riesgos que pueden ser mitigados y gestionados adecuadamente, y ya existe experiencia de manejo y almacenamiento en México y a nivel mundial. Este reto deberá ser abordado por la industria en el futuro.

México tiene sólidas relaciones comerciales en Sudamérica y Norteamérica, así como en todo el mundo

México se ha consolidado como un importante centro de intercambio comercial entre América del Norte y del Sur y ha aprovechado su acceso a los océanos Pacífico y Atlántico, lo que le permite acceder a los mercados asiáticos, así como a Europa y África. México es la segunda economía más grande de América Latina y la 15ª del mundo. Su participación en el Acuerdo Estados Unidos-México-Canadá (USMCA) y en el Mercado Común del Sur (MERCOSUR) refuerza aún más sus oportunidades de mercado y sus relaciones comerciales. Estos factores significan que México está en una buena posición para impulsar el mercado de los combustibles con cero emisiones de carbono y abastecer una creciente demanda mundial.

Si se adelanta, México puede marcar la tendencia de la adopción de los electrocombustibles y posicionarse como una parte clave de las rutas marítimas mundiales de cero emisiones de carbono

Las naves internacionales que adopten el abastecimiento de combustible con cero emisiones de carbono (suministro de combustible para uso de las naves) deben tener la oportunidad de repostar a lo largo de su viaje, utilizando combustibles y las tecnologías de abastecimiento adecuadas que sean compatibles con los requisitos del buque. Por lo tanto, en cierta medida, debe haber una coordinación con el sector marítimo mundial para garantizar la disponibilidad tanto de los combustibles como de la infraestructura, y la industria marítima debe establecer normas para fomentar la transición hacia el carbono cero tanto de las naves como de los puertos. México puede ser parte del impulso de estos estándares internacionales como parte importante del sector marítimo internacional y como pionero en combustibles cero carbono, dada la ubicación crucial de sus puertos.

Casos de Estudio Portuarios

Este informe destaca los puertos de Manzanillo, Cozumel y Coatzacoalcos, tres grandes ejemplos de cómo diferentes tipos de puertos en México podrían capitalizar una transición hacia cero emisiones de carbono: grandes puertos comerciales que manejan una cantidad significativa de bienes de importación y exportación de México (Manzanillo), puertos más pequeños de México con menos tráfico y buques más pequeños (Cozumel), y puertos con industrias de producción existentes y capacidades de exportación (Coatzacoalcos). Estos perfiles portuarios ejemplifican un número significativo de puertos en todo México, y cubren una gama de casos de uso y beneficios potenciales, lo que permite a México cumplir con sus objetivos de descarbonización, así como diversificar las actividades portuarias existentes, como la industria y el turismo, y crear un centro de producción y exportación de combustibles con cero emisiones de carbono.

La adopción de tecnologías de propulsión con cero emisiones de carbono en los puertos de México podría atraer una inversión de entre **36.7 - 52.8 mil millones** de pesos mexicanos en infraestructuras terrestres para **2030**.

Glosario

AIS	Automatic Identification System (Sistema de Identificación Automática)
CCS	Carbon Capture and Storage (Captura y almacenamiento de carbono)
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CSP	Energía Solar Concentrada (por sus siglas en inglés)
EDF	Environmental Defense Fund (Fondo de Defensa Ambiental)
EPP	Equipo de protección personal
GHG	Greenhouse Gas (Gas de efecto invernadero)
GHGP	Greenhouse Gas Protocol (Protocolo de Gases de Efecto Invernadero)
GtZ	Getting to Zero Coalition (por sus siglas en inglés)
ICE	Motor de combustión interna (por sus siglas en inglés)
IGF	International Code of Safety for Ships using Gases (Código Internacional de Seguridad para Buques que utilizan Gases)
IMO	International Maritime Organization (Organización Marítima Internacional)
MARPOL	Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por las Naves
MCA	Análisis Multicriterios (por sus siglas en inglés)
MtCO₂e	Megatoneladas de dióxido de carbono equivalente
P4G	Partnering for Green Growth and the Global Goals 2030 (Asociación para el Crecimiento Verde y los Objetivos Mundiales 2030)
SOLAS	Safety of Life at Sea (Seguridad de la vida en el mar)
SMR	Reforma del metano por vapor
TWh	Teravatios hora
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático)

Introducción

La descarbonización del transporte marítimo podría catalizar la inversión y una acción climática más amplia en México

La adopción de combustibles para el transporte marítimo con cero emisiones de carbono tiene importantes beneficios y sinergias para México que van mucho más allá del sector marítimo.



La Asociación de la Getting to Zero Coalition, y P4G, implementada conjuntamente por el Global Maritime Forum, Friends of Ocean Action, el World Economic Forum, el Environmental Defense Fund, University College London y International Association of Ports, está aprovechando la plataforma P4G para involucrar a las partes interesadas y a las empresas de tres países socios de P4G: Indonesia, México y Sudáfrica. El objetivo es hacer realidad las embarcaciones y los combustibles de emisiones cero e identificar oportunidades de crecimiento y de negocio concretas y viables que puedan contribuir a un crecimiento económico sostenible e integrador en estos países.

Este informe explora el contexto y el potencial para la adopción de combustibles marítimos con cero emisiones de carbono a través del sector marítimo de México. Este trabajo tiene una importante relevancia global, ya que el sector del transporte marítimo se esfuerza por descarbonizarse. La International Maritime Organization (IMO), como organismo regulador del transporte marítimo internacional, tiene como objetivo reducir las emisiones de GEI en un 50% respecto a los niveles de 2008 para el año 2050.

Este informe forma parte de un proyecto más amplio que investiga la posible adopción de combustibles para el transporte marítimo con cero emisiones en Indonesia, Sudáfrica y México, y se basa en los trabajos anteriores del Fondo de Defensa Ambiental (EDF) en el ámbito del transporte marítimo con bajas emisiones de carbono, como *Sailing on Solar - Could green ammonia decarbonize international shipping?* [3], y *Electrofuels for shipping: How synthetic fuels from renewable electricity could unlock sustainable investment in countries like Chile* [4].

El análisis de este informe tiene en cuenta las características económicas y geográficas únicas de México para comprender la escala potencial de las aplicaciones de los combustibles marítimos con cero y bajas emisiones de carbono, las aplicaciones dentro y fuera del transporte marítimo, y los beneficios que esto podría aportar a México. Ha incluido la visión y las aportaciones de un Comité Directivo formado para apoyar la Asociación de P4G-Getting to Zero Coalition.

México ha dependido históricamente de los combustibles fósiles como fuentes primarias de energía para el país. El gas natural por sí solo representó casi el 40% de la mezcla de suministro de energía nacional en 2019, mientras que la energía solar fotovoltaica y la eólica combinadas contribuyeron sólo el 3% [5]. Sin embargo, de cara al futuro, el panorama podría cambiar, ya que México ha establecido legalmente objetivos renovables y de descarbonización que está bien preparado para alcanzar. Estos incluyen la reducción de las emisiones de GEI en un 22% por debajo de la línea base al 2030, un 35% de energías renovables para 2024 y una reducción total del 50% de las emisiones de GEI para 2050 [7].

El país cuenta con una gran cantidad de recursos naturales disponibles [8] que pueden ser canalizados no sólo para descarbonizar la generación de electricidad, sino también para producir electrocombustibles como el hidrógeno y el amoníaco que podrían ayudar a descarbonizar otros sectores y aplicaciones como la industria, que representa más del 30% del Producto Interior Bruto (PIB) del país [9]. El hidrógeno ya se consume en México en la refinación de petróleo y en la industria siderúrgica. Con el declive de las reservas de petróleo y de los pozos en tierra, junto con el alto coste de la extracción en el mar, México ya ha empezado a buscar nuevas fuentes de energía primaria. La Asociación Mexicana de Hidrógeno (AMH), constituida en 2021, reúne a empresas energéticas, grupos comerciales de energía y agencias. Su objetivo es desarrollar un plan nacional de hidrógeno [10].

Beneficios y sinergias para México más allá del transporte marítimo

La adopción de combustibles marítimos con cero emisiones de carbono es una vía directa para descarbonizar el sector marítimo. Sin embargo, también tiene importantes beneficios y sinergias para México más allá del transporte marítimo, incluyendo:

1. **Creación de empleos verdes** en toda la gama de niveles de calificación y educación, apoyando una transición justa y equitativa hacia una economía baja en carbono.
2. **Desarrollo de un nuevo producto de exportación** que posicionaría a México para alimentar una creciente demanda mundial de productos “verdes”.
3. **Impulsar la inversión en electricidad renovable**, combustibles de cero emisiones de carbono e infraestructuras sostenibles, que pueden ser apoyadas por la demanda fiable del sector marítimo mundial y pueden ser utilizadas para apoyar la descarbonización del sector eléctrico en general.
4. **Aumentar la seguridad e independencia energética** aprovechando los recursos renovables locales tanto para la producción de electricidad como de combustibles sintéticos.
5. **Disponibilidad de combustibles con cero emisiones de carbono** que pueden utilizarse para descarbonizar otros sectores en México, como el transporte pesado, la minería, la agricultura, la manufactura y las extensas industrias de mineral de hierro del país.
6. **Reducción de la contaminación atmosférica**, especialmente en torno a las ciudades portuarias, que suelen estar muy urbanizadas o tienen un alto nivel de turismo.
7. **Preservar los ecosistemas locales**, que no sólo son esenciales en sí mismos, sino que a menudo constituyen el núcleo de las economías locales centradas en el turismo en todo el país.

El desarrollo del sector de los combustibles con cero emisiones de carbono debe abordarse teniendo en cuenta las sinergias más allá del sector del transporte marítimo para obtener todos los beneficios y evitar posibles escollos. Es necesario seguir reflexionando para investigar estas sinergias.

Sección 1

Este informe se centra en los combustibles marítimos con cero emisiones de carbono

Hay una gran variedad de posibles combustibles marítimos con cero o bajas emisiones de carbono que se están considerando para su aplicación en el sector marítimo. Cada uno de ellos tiene sus ventajas, inconvenientes y consideraciones que deben tenerse en cuenta a la hora de seleccionar un combustible y de desarrollar la infraestructura de abastecimiento de combustible. Este informe se centra en los combustibles de cero emisiones de carbono y en las soluciones de propulsión que utilizan electricidad renovable y no emiten dióxido de carbono en la cadena de suministro o en el punto de uso, basándose en tecnologías que probablemente estén disponibles comercialmente a escala antes de 2030. La producción local de estos combustibles puede ser un elemento clave para garantizar estas condiciones, ya que ayudaría a evitar pérdidas y fugas, así como cualquier efecto adverso para la salud o el clima asociado a ellos.

Ilustración 1: Resumen de los combustibles con cero emisiones de carbono en los que se centra este informe.



Otros combustibles candidatos que no son objeto de este informe

Metanol verde

El hidrógeno verde puede combinarse con el dióxido de carbono para producir metanol, que tiene una mayor densidad energética que el amoníaco. El metanol verde es un líquido en condiciones ambientales y requiere una adaptación mínima de las naves diseñadas para los combustibles fósiles.

Para que se considere como cero emisiones de carbono, el dióxido de carbono debe capturarse directamente del aire o del agua de mar. Este informe no se centra en el metanol verde porque se supone que las tecnologías de captura directa de carbono del aire son inmaduras y es poco probable que sean viables a escala industrial dentro de los plazos de 2030 de este informe. Sin embargo, esto puede cambiar a medida que la tecnología madure, lo que significa que el metanol verde puede, en teoría, convertirse en una opción viable de combustible verde, como indican los resultados del análisis multicriterio descrito con más detalle en el Apéndice A.

Biocombustibles

Los biocombustibles pueden producirse a partir de diversas materias primas, como los cultivos energéticos o los residuos agrícolas y municipales. La combustión de estos combustibles produce emisiones de dióxido de carbono, y las emisiones del ciclo de vida dependen de la cadena de suministro y del proceso de producción.

Este informe no se centra en su uso para el transporte marítimo, ya que hay pocas materias primas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Además, la abundancia de recursos renovables en México indica que los combustibles derivados del hidrógeno serían más adecuados.

Hidrógeno azul y amoníaco

El hidrógeno puede producirse a partir de combustibles fósiles, que incluyen dióxido de carbono como subproducto. Si el dióxido de carbono se captura y almacena, el hidrógeno se denomina "hidrógeno azul", que puede combinarse con nitrógeno para formar "amoníaco azul".

Aunque los combustibles azules tienen potencial para el transporte marítimo, este informe se centra en los combustibles verdes como combustibles con cero emisiones de carbono. Esto se basa en la suposición de que las tecnologías de captura y almacenamiento de carbono son inmaduras, y no es probable que puedan alcanzar los niveles de captura necesarios para garantizar que las emisiones de carbono del ciclo de vida del azul sean significativamente menores que las del diésel, dentro de los plazos de 2030 de este informe y a escala industrial. La adopción de los combustibles azules también requeriría trabajar para mitigar las emisiones de la extracción y distribución de los combustibles fósiles. Véase el Apéndice E para más detalles.

Sección 2

Los combustibles marítimos con cero emisiones de carbono pueden utilizarse de forma segura con la normativa y la formación adecuadas

Al igual que ocurre con los combustibles marítimos de origen fósil, la manipulación de los combustibles con cero emisiones de carbono, incluidos el hidrógeno verde y el amoníaco, requiere una normativa y una formación adecuadas en el sector para que se lleve a cabo de forma segura evitando daños a las personas y al medio ambiente. Aunque este ámbito aún está en desarrollo, la ampliación de códigos como el IGF (Código Internacional de Seguridad para Buques que utilizan Gases) de la IMO puede resultar crucial para permitir la adopción segura de estos combustibles en la industria marítima. En el Apéndice B se incluye una tabla completa de peligros.

Ilustración 2: Resumen de los principales peligros e implicaciones de la manipulación de los combustibles marinos de cero emisiones.

	 Principales riesgos	Implicaciones para la manipulación
Electricidad renovable + batería	<ul style="list-style-type: none"> • Riesgo de exposición a la electricidad. • Los productos químicos de la batería pueden ser corrosivos. • La emisión de gases durante la carga puede suponer un riesgo de incendio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se necesitan procedimientos de funcionamiento seguro para minimizar el riesgo de exposición a la electricidad. • Se debe asegurar de que el equipo está en buenas condiciones debería limitar el riesgo de incendio o de exposición a productos químicos.
Hidrógeno verde (líquido)	<ul style="list-style-type: none"> • Extremadamente inflamable y explosivo. • Riesgo de quemaduras criogénicas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se debe asegurar que los tanques están en buen estado, se evitan las fugas y el gas no puede acumularse en espacios confinados. • La manipulación segura requiere un equipo de protección personal (EPP) adecuado.
Amoníaco verde (líquido)	<ul style="list-style-type: none"> • Altamente tóxico para el medio acuático y los seres humanos. • Explosivo e inflamable. 	<ul style="list-style-type: none"> • Como producto comercializado a nivel mundial, existen normas para el almacenamiento y la manipulación del amoníaco en las naves. • Hay que asegurarse de que los tanques están en buen estado, se evitan las fugas y el gas no puede acumularse en espacios confinados. • La manipulación segura requiere un EPP adecuado.
Diésel marino	<ul style="list-style-type: none"> • Inflamable y perjudicial si se inhala o se ingiere. • Tóxico para la vida acuática con efectos duraderos. 	<ul style="list-style-type: none"> • La manipulación segura requiere un EPP adecuado. • Debe evitarse estrictamente la exposición de las masas de agua al combustible.
Gas natural licuado	<ul style="list-style-type: none"> • Extremadamente inflamable y explosivo. • Riesgo de quemaduras criogénicas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se debe asegurar que los tanques están en buen estado, se evitan las fugas y el gas no puede acumularse en espacios confinados. • La manipulación segura requiere un EPP adecuado.

Las baterías y la infraestructura de carga han sido probadas para el transporte por carretera y se están desplegando rápidamente en muchos países. El suministro de energía en tierra en los puertos ya se está desplegando para reducir las emisiones de los sistemas de energía auxiliar de algunos buques.

El hidrógeno y el amoníaco se dominan bien en las aplicaciones industriales, con sus correspondientes reglamentos, normas y códigos de prácticas. También debe prestarse especial atención a la prevención de fugas a lo largo de la cadena de suministro de hidrógeno, aunque ésta y otras preocupaciones pueden abordarse mediante la reglamentación y la creación de mejores prácticas. Será necesario modificar los reglamentos y códigos que rigen el uso del combustible en las aplicaciones marítimas, que ya están en desarrollo. Además, el hidrógeno ya se consume en México en las industrias de refinado de petróleo, hierro y acero. El mayor consumidor de hidrógeno en México es Petróleos Mexicanos (PEMEX), el cual es suplido por terceros como producto secundario de otros productos químicos y también en instalaciones dedicadas [11] [12].

El amoníaco ya se utiliza en el sector agrícola de México, y es principalmente importado al país, lo que significa que la manipulación y el transporte del amoníaco ya se conocen bien. PEMEX está estudiando la posibilidad de desarrollar una fuerte producción nacional de nitrógeno para la agricultura a partir de gas natural [13], lo que podría crear una importante experiencia y conocimientos técnicos en torno al manejo del amoníaco, aunque con un alto coste medioambiental debido a las elevadas emisiones. Sin embargo, esto podría abrir la puerta a la producción local de fertilizantes verdes con hidrógeno y amoníaco verdes, así como a su manipulación segura para otros fines.

Las Sociedades de Clasificación de todo el mundo han publicado documentos relacionados con el uso del hidrógeno y el amoníaco y están elaborando normas de clase para los combustibles que pueden ser aceptadas por las Administraciones de Bandera individuales [14, 15, 16, 17]. Se prevé que el Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS) de la IMO se actualice siguiendo la estela de las normas establecidas por las Sociedades de Clasificación, que tienden a ajustarse más rápidamente. La colaboración y los compromisos internacionales, como el Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por las naves (MARPOL) de la IMO, también pueden convertirse en grandes oportunidades para que México impulse la adopción de nuevos combustibles bajos en carbono de forma limpia y segura.



Sección 3

El mejor enfoque para la adopción de combustibles de transporte marítimo con cero emisiones de carbono depende del mercado global, los requisitos del buque y la disponibilidad de recursos naturales

Aunque descarbonizar el sector del transporte marítimo puede ser un reto, se han establecido objetivos ambiciosos en este sentido: la IMO ha fijado el objetivo de reducir las emisiones en al menos un 50% para 2050 (en relación con los niveles de 2008) y, más recientemente, se ha anunciado que la IMO empezará a trabajar con los gobiernos para alcanzar un objetivo más ambicioso de descarbonizar completamente el sector en ese mismo plazo. La adopción generalizada de los electrocombustibles desempeñará probablemente un papel importante en la consecución de estos objetivos. Para lograrlo, habrá que abordar dos importantes retos, tanto a escala local como mundial: su producción basada en las necesidades y recursos locales, y su almacenamiento, transporte y uso seguros, para evitar fugas y minimizar riesgos.

La elección de los combustibles marítimos con cero emisiones de carbono para el abastecimiento de las naves en México depende de una serie de factores, como la aceptación en el sector marítimo mundial, el contexto local en torno al puerto, el coste y las implicaciones prácticas de la infraestructura, las características de los combustibles y la adecuación a las diferentes aplicaciones marítimas.

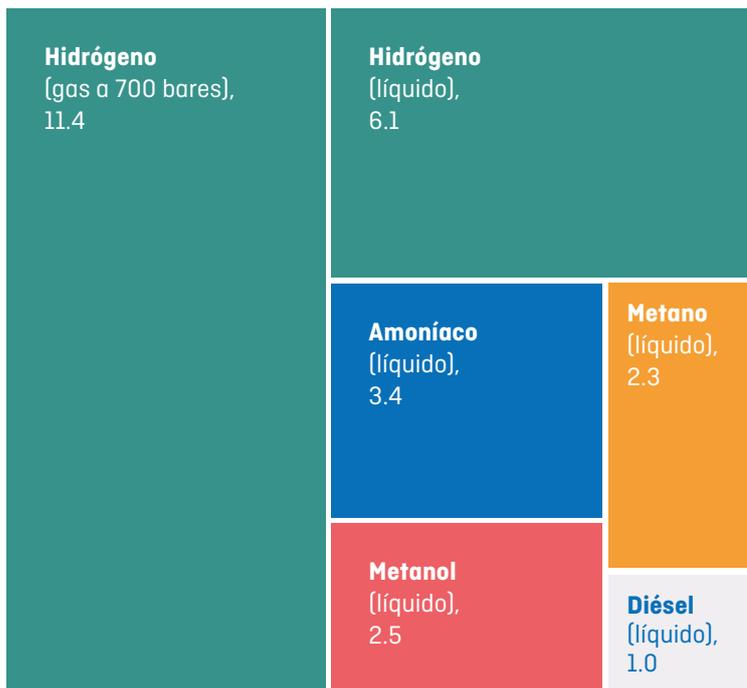
Mercados mundiales de combustibles con cero emisiones de carbono

México se encuentra en una posición ventajosa desde el punto de vista geográfico; entre las grandes economías de América del Norte y del Sur, en las proximidades del Canal de Panamá, con acceso a los océanos Atlántico y Pacífico y su costa caribeña con un denso tráfico de cruceros. A nivel mundial, el hidrógeno verde y el amoníaco verde han surgido como combustibles importantes para la descarbonización del transporte marítimo. México ya ha expresado su interés en adoptar estos combustibles, aunque todavía se encuentra en las primeras fases de desarrollo. Alinear la selección de combustibles con el resto del mundo significaría que las naves internacionales podrían abastecerse de combustible en México. El desarrollo de la tecnología de abastecimiento de combustible y de las naves estará disponible comercialmente para el mercado mundial, incluido Estados Unidos, que ya está estudiando la adopción de estos combustibles para las naves comerciales. Esto podría permitir que México se convirtiera en un centro de abastecimiento de combustible con cero emisiones de carbono, proporcionando a las naves internacionales con combustible con cero emisiones de carbono, así como produciendo un nuevo producto que puede ser exportado a nivel mundial. Esto podría ser un ejemplo de cómo los combustibles con cero emisiones de carbono pueden integrarse con éxito en la industria marítima, así como para su uso en otras actividades alrededor de los puertos de México.

La aptitud de los combustibles para diferentes aplicaciones

La densidad energética de un combustible es la cantidad de energía que puede proporcionar por unidad de volumen. Una densidad energética más baja significa que un buque no podrá viajar tan lejos con un tamaño de almacenamiento de combustible fijo y tendrá que parar para repostar más a menudo. La Ilustración 3 muestra las densidades energéticas de varios combustibles en relación con el diésel, y muestra que los combustibles sin carbono (hidrógeno y amoníaco) tienen densidades energéticas más bajas que los combustibles que contienen carbono.

Ilustración 3: Densidad energética de varios combustibles para el transporte marítimo (volumen de almacenamiento, incluido el depósito, en relación con el diésel) [19]



Costos del combustible y seguridad energética

Depender de los combustibles extranjeros para abastecer al sector naviero añade el riesgo de las crisis de precios (dada la naturaleza interconectada de los mercados mundiales de materias primas) y dificulta la seguridad del suministro. Producir estos combustibles a partir de recursos renovables locales reduce en gran medida ambos riesgos. En el futuro, su uso puede incluso llegar a ser competitivo en cuanto a costes en comparación con los combustibles fósiles debido a la fiscalidad – tanto a nivel nacional como internacional – y a los ritmos de aprendizaje y reducción de costes derivados de la madurez de la industria a medida que avanza la transición. Se estima que México puede producir hidrógeno verde a un coste hasta un 64% inferior al de otros países con recursos renovables menos favorables [18], y los costes se reducirán aún más a medida que componentes clave como los electrolizadores y las energías renovables avancen en sus curvas de reducción de costes tecnológicos.

La densidad energética de un sistema de propulsión basado en baterías es aproximadamente una cuarta parte de la de un sistema de hidrógeno gaseoso [20]. Esto significa que las actuales tecnologías de baterías sólo son adecuadas para las naves más pequeñas, en las que el volumen a bordo es una limitación menor. Las naves de mayor tamaño y las naves internacionales, en particular, tienen más probabilidades de encontrar que el amoníaco verde es el combustible de cero emisiones de carbono más adecuado, ya que tiene la mayor densidad de energía.

La elección de los combustibles también puede depender de los requisitos de manipulación y las implicaciones de seguridad del combustible; por ejemplo, algunas aplicaciones pueden ser menos adecuadas para utilizar amoníaco debido al riesgo para la salud pública en caso de fuga. Esto puede ser una consideración en los transbordadores, por ejemplo. En el Apéndice A se describe el análisis multicriterio de varios combustibles con cero y bajas emisiones de carbono realizado para apoyar este proyecto.

Patrones de navegación

La ubicación del puerto y el número y tipo de buques que lo visitan son factores importantes para entender la selección del combustible y el diseño de la solución de infraestructura. Algunas aplicaciones de transporte marítimo serán más adecuadas para la rápida adopción de los nuevos combustibles con cero emisiones de carbono.

Los grandes buques, como los graneleros, que viajan regularmente entre un pequeño número de grandes puertos, son muy adecuados para la adopción temprana de los combustibles con cero emisiones de carbono, ya que es más probable que los puertos más grandes puedan proporcionar los acuerdos de abastecimiento de combustible necesarios, y la inversión estará respaldada por la demanda regular de los mismos grandes buques. Las naves con base en uno o dos puertos locales, como los remolcadores, los transbordadores y los servicios de altamar, pueden beneficiarse de la disponibilidad de combustibles con cero emisiones de carbono para las naves de mayor tamaño o pueden funcionar a base de baterías.

Las naves que visitan muchos más puertos o puertos más pequeños pueden tener más dificultades para encontrar puertos que puedan suministrar los nuevos combustibles, por lo que pueden tardar más en adoptar los combustibles con cero emisiones de carbono.

Recursos naturales y terrenos disponibles en el puerto

La adopción de los combustibles con cero emisiones de carbono depende de la disponibilidad de recursos naturales adecuados (por ejemplo, el potencial de generación de electricidad renovable y el agua para la electrólisis), y de terrenos para producir y almacenar los combustibles. Como es probable que las plantas de producción de combustibles estén cerca de los puertos, se puede utilizar agua de mar para la electrólisis, lo que requeriría la incorporación de equipos de desalinización. El coste de una planta de desalinización es muy pequeño en comparación con el resto de la infraestructura y el establecimiento de esta infraestructura podría tener otros beneficios para abordar los problemas de escasez de agua mediante la creación de economías de escala apoyadas por la demanda de agua para la producción de combustible.

Hay que tener muy en cuenta el impacto medioambiental y social de cualquier cambio en las infraestructuras y en el uso del suelo (tanto directo como indirecto). Por ejemplo, la sustitución de la agricultura productora de alimentos, el hábitat o los terrenos forestales por infraestructuras de combustible.

Además, el desarrollo de la generación renovable para la producción de combustibles debe ser en adición a la desarrollada para abastecer una mayor demanda de electricidad y descarbonizar la red en México. Si no se dispone de recursos naturales cerca del puerto, el combustible puede importarse de otros lugares, o las naves que hagan escala en el puerto pueden tener que hacer paradas separadas de abastecimiento de combustible en otros lugares donde existan los recursos para generar combustibles con cero emisiones de carbono de forma sostenible. Sin embargo, las soluciones locales serían beneficiosas siempre que fueran factibles, ya que no sólo reducirían los costes de infraestructura y transporte, sino también las posibles emisiones asociadas a ellos o al almacenamiento de estos combustibles.

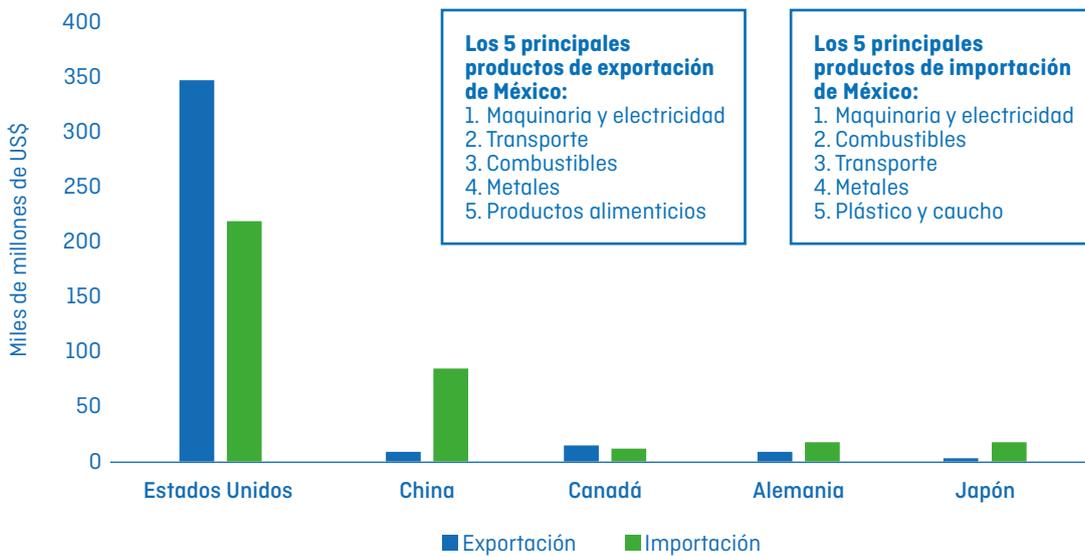
Sección 4

México está bien situado como uno de los principales centros de intercambio principal entre América del Norte y del Sur

México es la segunda economía más grande de América Latina y la 15ª del mundo [21]. El país tiene un mercado diversificado y fuertes relaciones comerciales con sus países vecinos. Forma parte del Acuerdo Estados Unidos-México-Canadá (USMCA), que sustituye al Tratado de Libre Comercio de América del Norte, y del MERCOSUR, donde México actúa como miembro observador.

La posición geográfica de México en los océanos Pacífico y Atlántico le da acceso a los mercados asiáticos, así como a Europa y África. Los principales socios comerciales son Estados Unidos, China y Canadá. México es un importante exportador de automóviles y sus partes, junto con aceites de petróleo y otros combustibles [22].

Ilustración 4: Los principales socios comerciales de México por importación y exportación

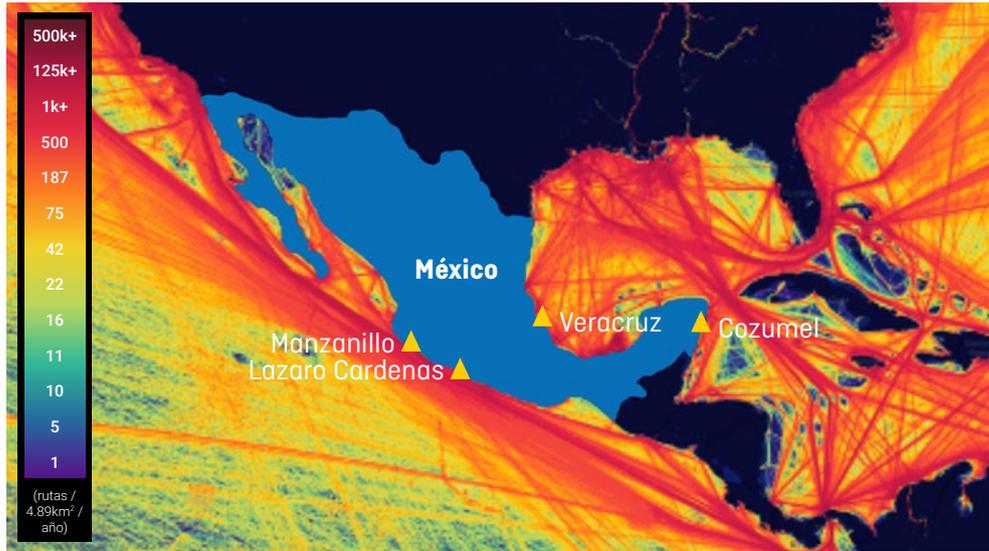


La posición de México como uno de los principales centros de intercambio queda ilustrada por la variedad de tipos de buques que visitan sus puertos. La mayor parte del tráfico marítimo mexicano está dominado por las naves de servicio en altamar, pero éstas no son las que consumen la mayor parte de la energía del combustible. La mayor proporción del consumo de combustible¹ (35%) se atribuye a las naves portacontenedores, que suelen ser más grandes y tienen trayectos más largos que las naves de servicio en altamar.

¹ A lo largo de este informe, la demanda de energía de las naves es la demanda de energía calculada de los viajes de salida de los puertos mexicanos basada en datos de 2018 [16, 17]

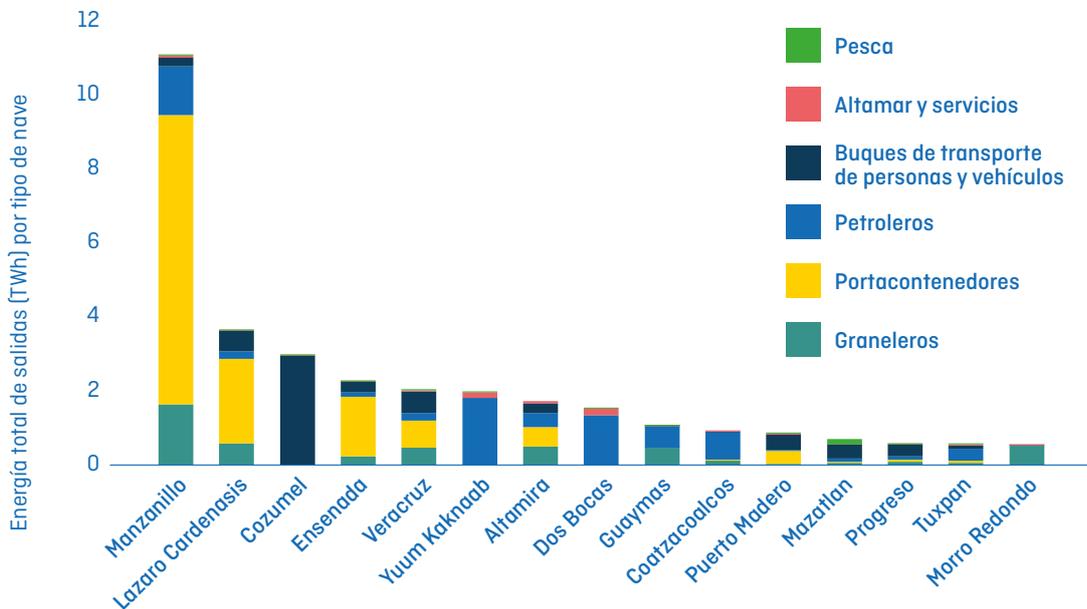
Manzanillo es el puerto más grande de México en términos de uso de energía. Este puerto es responsable de la carga del Pacífico para la Ciudad de México; la capital y la ciudad más grande de América del Norte, y maneja una gran parte de los productos manufacturados de las instalaciones industriales en el noroeste de México y otras regiones [23]. Los siguientes puertos más grandes de México se encuentran en todo el país, tanto en el litoral del Pacífico como en el del Atlántico, como se muestra en la ilustración 5 (abajo).

Ilustración 5: Mapa de México mostrando el tráfico marítimo y los puertos marítimos más concurridos de México. La información de tráfico es de MarineTraffic.com y ha sido utilizada con permiso.



La ilustración 6 muestra que estos grandes puertos están dominados por el tráfico de portacontenedores. Sin embargo, otros puertos muestran una diversidad de buques y, en particular, cómo los puertos son particularmente adecuados para un tipo de buque singular. Cozumel, por ejemplo, situado en la península de Yucatán, atiende principalmente a buques de transporte de personas y vehículos, probablemente por su industria turística y su proximidad a las islas del Caribe. Del mismo modo, el puerto de Dos Bocas, en el sureste del país, presta servicio principalmente a buques cisterna que traen petróleo del golfo al puerto para ser refinado.

Ilustración 6: Uso de energía de naves salientes, mostrando los 15 puertos más grandes de México



Sección 5

México actualmente depende parcialmente del gas importado de Norteamérica para producir electricidad, pero tiene objetivos ambiciosos para reducir las emisiones de carbono

El sector eléctrico de México ha experimentado recientemente un cambio, pasando de un modelo tradicional gestionado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), de propiedad estatal, a una nueva estructura de mercado, desencadenada por la Reforma Energética. Tras la Reforma Energética, los generadores privados, así como la CFE, pueden abastecer a los usuarios, aunque los servicios de transmisión y distribución de electricidad siguen siendo propiedad del Estado mexicano. Sin embargo, el Estado mexicano puede celebrar contratos con el sector privado para la operación de las redes de transmisión y distribución.

En 2019, el gas natural representó el 60% de la generación total de electricidad en México. El gas natural se importa en gran medida a México desde Estados Unidos y se beneficia de los bajos precios del gas norteamericano.

La Secretaría de Energía de México espera un crecimiento considerable de la capacidad de generación y transmisión en los próximos años. Para 2024, prevén que se añadan más de 19 GW de capacidad de generación nueva y de sustitución – la mitad de ellos correspondientes a la energía solar fotovoltaica – y que se energicen más de 3,300 km de nuevas líneas de transmisión y distribución. También se espera que crezca la generación distribuida, ya que la previsión indica que es probable que se pongan en marcha cerca de 6 GW en 2025, y que aumenten hasta casi 14 GW en 2035 [24].

Ilustración 7: Matriz de generación de electricidad de México histórica [42]

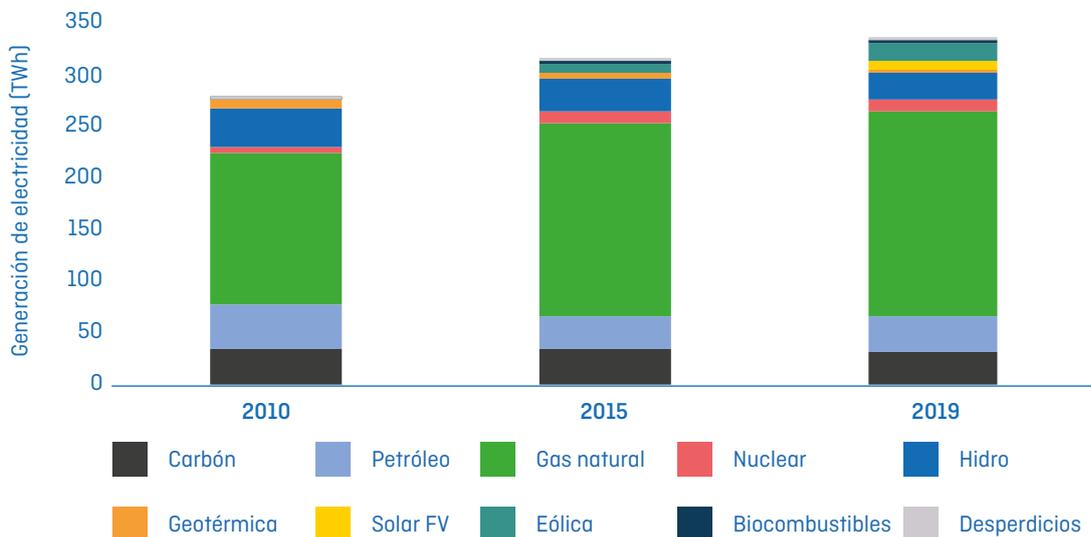
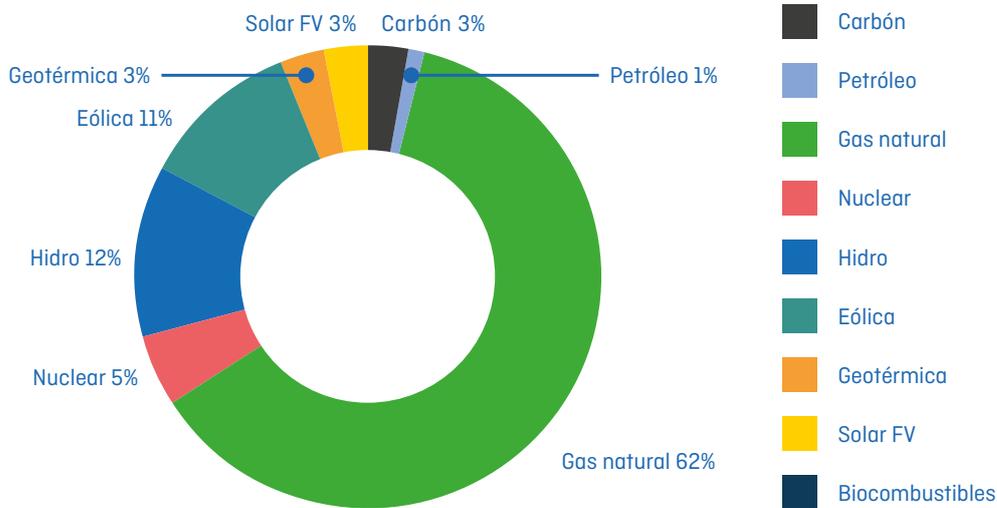


Ilustración 8: Matriz de generación eléctrica esperada para México en el 2030 [27]



México se ha comprometido a reducir las emisiones de GEI en un 22% y las de carbono negro en un 51% por debajo de la línea base para 2030, lo que implica que las emisiones alcanzarán su punto máximo en 2026 y que la intensidad de las emisiones de GEI por unidad de PIB se reducirá en aproximadamente un 40% entre 2013 y 2030 [25]. Existe un objetivo condicional para reducir aún más las emisiones de GEI en un 36% y las de carbono negro en un 70% por debajo de la línea base para 2030, siempre que se cuente con el apoyo internacional.

En el marco del Acuerdo de Copenhague, México se propuso reducir sus emisiones de GEI hasta en un 30% con respecto al escenario habitual (business as usual) para 2020, sujeto a la provisión de apoyo financiero y tecnológico adecuado por parte de los países desarrollados como parte de un acuerdo global”. Las políticas y los esfuerzos no alcanzaron este objetivo [26].

En noviembre de 2016, México presentó ante la UNFCCC su “Climate Change Mid-Century Strategy” (Estrategia de Cambio Climático de Mediano Siglo) de acuerdo con el Acuerdo de París (Gobierno de México, 2016). Con esta estrategia, México se compromete a reducir sus emisiones de GEI en un 50% por debajo de los niveles del año 2000 para el año 2050, mientras que las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC, por sus siglas en inglés) de México establecen un objetivo provisional de una reducción del 22% en comparación con la línea base para el año 2030. El potencial para apoyar la descarbonización de la industria marítima internacional y que México se establezca como pionero en la producción de combustibles con cero emisiones de carbono requerirá que el gobierno mexicano establezca políticas que apoyen activamente el desarrollo de energías renovables para abastecer su demanda interna y también para generar combustibles para el transporte marítimo.

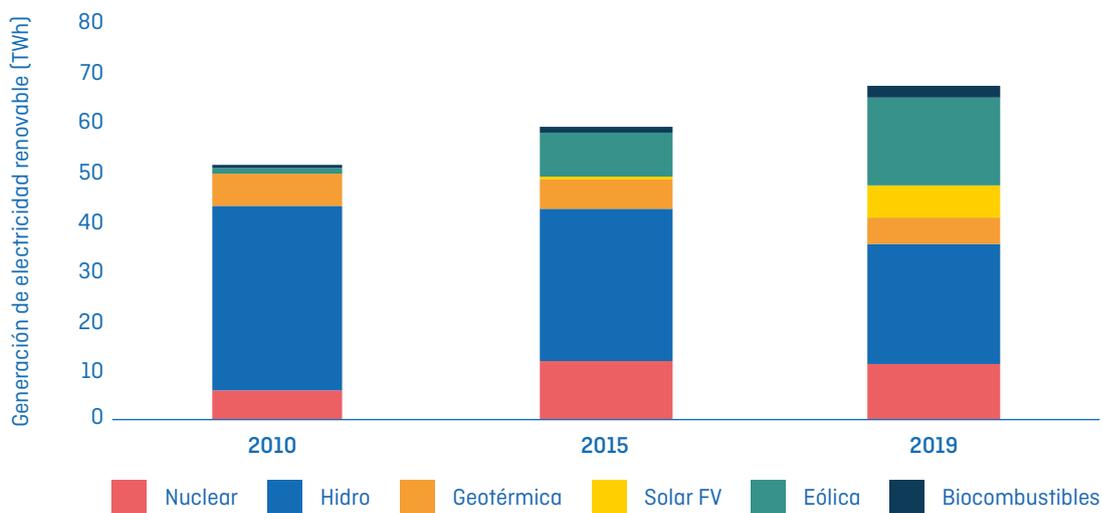
Sección 6

México tiene un importante potencial renovable que podría abastecer su demanda eléctrica y más

La generación limpia representó el 23% de la generación total de electricidad en 2019, principalmente a partir de la energía hidroeléctrica y eólica. La proporción de generación de fuentes eólicas y solares ha aumentado entre 2010 y 2019, en gran parte debido a la reforma energética del país mencionada en la sección 5 anterior. La generación eólica se localiza principalmente en Oaxaca en el sur, y la solar en los estados del noroeste.

El gobierno mexicano ha considerado varios escenarios para cuantificar el potencial renovable del país. Estos escenarios tienen en cuenta aspectos como la proximidad de los recursos renovables a la infraestructura de red existente. Basándose en la información recopilada por el gobierno, se prevé que hay miles de teravatios hora (TWh) de energía solar y eólica sin explorar que podrían contribuir a la red de México y a la producción de combustibles bajos en carbono.

Ilustración 9: Generación renovable y baja en carbono histórica de México [42]



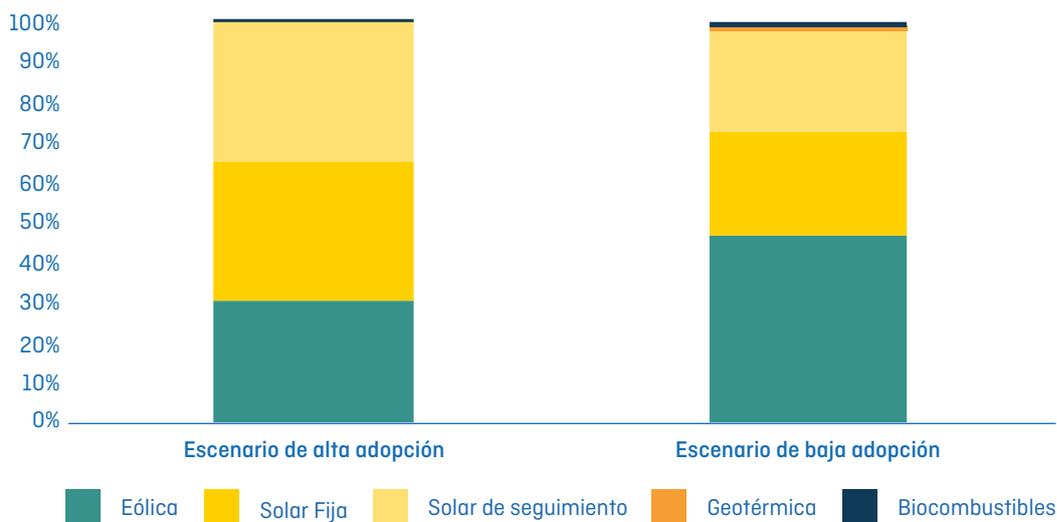
Este informe analiza dos de los cuatro escenarios diferentes de adopción de la energía solar y eólica en el país [27]. Aunque se han analizado cuatro escenarios, este informe sólo considera el más alto y el más bajo, que son los escenarios de alta y moderada adopción, respectivamente:

El escenario de alta adopción identifica las áreas de alto potencial para el desarrollo de proyectos de generación de electricidad solar y eólica sin considerar la proximidad a las redes generales de transmisión. Este escenario arroja una capacidad instalable probable de 2,472 GW y un potencial de generación probable de 4,904 TWh al año.

Escenario de adopción moderada, de forma similar al escenario de captación alta, este escenario identifica zonas de alto potencial para el desarrollo de proyectos de generación solar y eólica teniendo en cuenta la proximidad a las redes generales de transporte. Este escenario, cuyo criterio es una distancia menor o igual a 10 km, arroja una capacidad instalable probable de 378 GW y un potencial de generación de 864 TWh al año. Aunque se trata de un aumento de diez veces con respecto a 2019, la exportación de electrocombustibles con cero emisiones de carbono desencadenaría una demanda renovable adicional, en cuyo caso habría que explotar emplazamientos menos favorables, lo que daría lugar a precios más elevados.

Estos escenarios no incluyen el desarrollo de energía hidroeléctrica adicional más allá de la capacidad existente, ya que la tecnología ya está bien establecida en México. Por lo tanto, la adopción de las energías renovables (o, al menos, de las bajas emisiones de carbono) podría ser incluso mayor de lo previsto en los escenarios si se consideraran desarrollos hidroeléctricos adicionales, tanto a pequeña como a gran escala, para los que existe un mayor potencial. La Secretaría de Energía ha señalado en la Prospectiva de Energías Renovables (2016-2030) que México tiene un potencial probado para generar cerca de 4.7 TWh/año a partir de centrales hidroeléctricas [27]. También hay oportunidades en plantas de menor escala, según el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE) hay 16 TWh/año de potencial adicional de pequeñas hidroeléctricas en México de aquí al 2030.

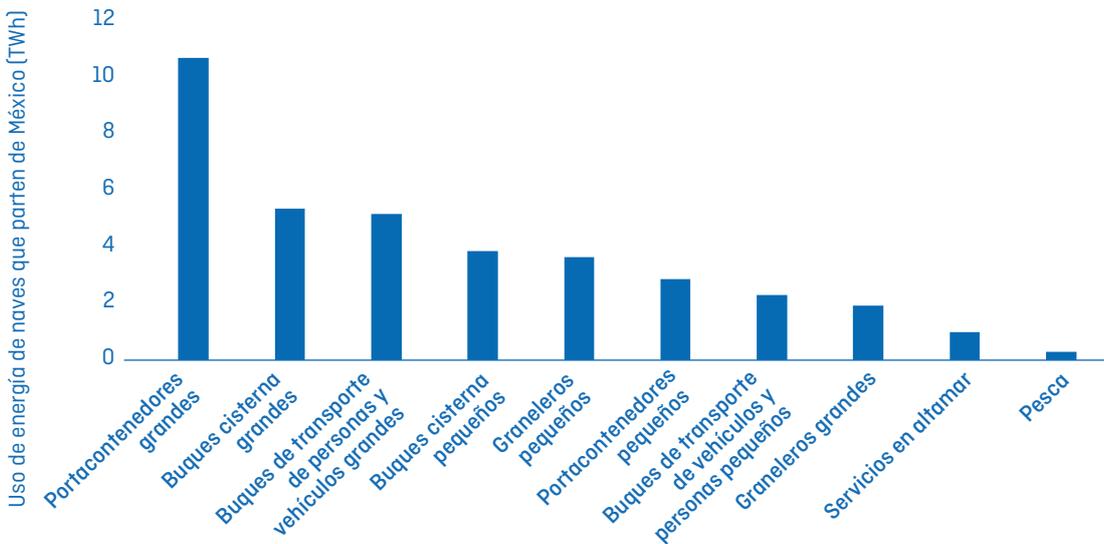
Ilustración 10: Potencial renovable solar, eólico, geotérmico y de biomasa basado en los escenarios producidos por la Secretaría de Energía de México [27].



Sección 7

La abundancia de potencial renovable de México lo sitúa en una sólida posición para producir combustibles con cero emisiones de carbono

Ilustración 11: Uso de energía por categoría de nave en México, basado en la energía requerida a la salida



La mayor demanda de energía de las naves que salen de los puertos mexicanos son los grandes buques portacontenedores, que transportan las mercancías producidas en México por todo el mundo a sus socios comerciales. En total, la demanda de energía de combustible de todas las naves comerciales nacionales e internacionales que proporcionan datos del Sistema de Identificación Automática (AIS) que salen de los puertos mexicanos fue de aproximadamente 37 TWh/año en 2018 [28]. Además de esto, hay embarcaciones comerciales, industriales y privadas más pequeñas que no tienen AIS, con una demanda de energía de combustible estimada de alrededor de 2 TWh/año, lo que da una demanda total de energía de aproximadamente 39 TWh/año.

Para determinar la cantidad de electricidad renovable que se necesitaría para suministrar esta energía a través de tecnologías de propulsión con cero emisiones de carbono (baterías, hidrógeno verde y amoníaco verde), hay que tener en cuenta la eficiencia de los procesos necesarios para crear los combustibles y utilizarlos en las naves. Las metodologías utilizadas para ello se describen en el Apéndice D.

Suponiendo un escenario extremo de completa adopción de tecnologías de naves con cero emisiones de carbono para 2030, México necesitaría aproximadamente 69 TWh/año de electricidad renovable para satisfacer la demanda. Se trata de una necesidad importante. Sin embargo, un documento del Foro Marítimo Global estimó que se requiere un 5% de adopción de combustibles de cero emisiones de carbono para 2030 para poner a la industria en el camino de sus objetivos de descarbonización, y esto incluso se ha convertido ahora en el objetivo de la Misión de Transporte Marítimo de Emisiones Cero de Mission Innovation [29]. Aunque esta cifra no pretende reflejar los objetivos de cada país, se utiliza aquí como una escala razonable de adopción de combustibles de cero emisiones de carbono para producir resultados de ejemplo.

Suponiendo que las naves que visitan los puertos de México adopten un 5% de combustibles con cero emisiones de carbono y que todos estos buques reposten durante sus visitas, se necesitarían unos 3.47 TWh/año de generación renovable en 2030 (véase el apéndice D) y un aumento posterior. Esto puede considerarse un objetivo altamente alcanzable dado el amplio potencial renovable del país.

Incluso las estimaciones más conservadoras del potencial renovable de México indican que los recursos locales pueden satisfacer tanto las necesidades de la red eléctrica como la demanda adicional de la producción de electrocombustibles, incluso en un escenario de adopción del 100%. Sin embargo, se espera que la transición hacia un transporte marítimo sin emisiones de carbono se produzca en un horizonte más largo, más allá de 2030. Para entonces, es probable que los avances tecnológicos en materia de energías renovables – como la solar fotovoltaica, la eólica terrestre y la marina, y potencialmente otras como la energía de las olas y la marina –, junto con la expansión de las redes eléctricas en el país, permitan que un potencial renovable mucho mayor sea económicamente accesible. Al proporcionar una fuente de demanda de energía renovable, la adopción de los electrocombustibles puede ayudar a sentar las bases de la descarbonización, al aumentar la capacidad y la infraestructura de las renovables, descarbonizar las aplicaciones y crear experiencia local. Mientras tanto, la red tendría tiempo para expandirse y hacerse más robusta, preparándose para una integración más generalizada de las fuentes de energía renovable en la red eléctrica, que puede ser crucial para permitir la transición energética de México.

En términos monetarios, existe la posibilidad de atraer una inversión de entre 36.7 - 52.8 mil millones de pesos mexicanos para construir la infraestructura necesaria hasta 2030 para suministrar electricidad renovable y combustibles de cero emisiones de carbono para descarbonizar el 5% de las naves que visitan los puertos de México. De estos 23.8 - 35.8 mil millones de pesos mexicanos se destinarían a parques solares y eólicos, y el resto a plantas verdes de hidrógeno y amoníaco, así como a la infraestructura relacionada. En el Apéndice D se ofrecen más detalles.

Generación de electricidad renovable necesaria para apoyar la adopción del 5% de las tecnologías de buques con cero emisiones de carbono en 2030:

~3.47 TWh/año

El potencial de inversión en infraestructura para apoyar la adopción del 5% de las tecnologías de buques con cero emisiones de carbono en 2030:

36.7 – 52.8 mil millones de pesos mexicanos

Se prevé que la demanda nacional de electricidad de México en 2030 sea de:

600 TWh/año

El potencial renovable de México:

864 – 4,094 TWh/año

Sección 8

La adopción de combustibles con cero emisiones de carbono puede aportar otros beneficios

La descarbonización del sector del transporte marítimo en México podría tener beneficios colaterales más amplios al considerar el desarrollo sostenible, incluyendo la creación de empleos verdes para apoyar una transición justa, apoyando el acceso a la demanda global de productos y materias primas verdes, y permitiendo una descarbonización más amplia más allá del sector del transporte marítimo.

Seguridad energética

A medida que se eliminan los combustibles tradicionales como el gas, el carbón y el petróleo, México tiene la oportunidad de ser más independiente desde el punto de vista energético, dependiendo menos de la energía importada y desarrollando su propia producción y consumo nacional. Esto tiene la ventaja de proteger a la economía de las interrupciones de precios de los combustibles fósiles y también una mayor estabilidad en el suministro de energía en todo el país. Junto con otros beneficios para la salud, la economía y la descarbonización, esto puede convertirse en un sólido argumento para el apoyo y los incentivos del gobierno hacia el aumento de la capacidad de energía renovable y otros elementos clave necesarios para permitir las economías de electrocombustibles.

Creación de empleos verdes en toda la gama de niveles de cualificación y educación

Dado que se espera que varias economías locales realicen la transición de una economía basada en los combustibles fósiles a otra menos intensiva en carbono, es importante considerar el concepto de una transición justa en la que se apoye a los que se verán afectados por la transición. Esto incluye a las personas y comunidades que dependen de las industrias basadas en los combustibles fósiles para el empleo y para sostener sus economías, así como a las comunidades locales e indígenas que podrían verse afectadas negativamente por estos desarrollos.

La producción de combustibles alternativos iría acompañada de la creación de una amplia gama de puestos de trabajo dentro de las cadenas de suministro en la construcción y la operación. A medida que disminuyen los empleos en la extracción de combustibles fósiles, el transporte y la generación de electricidad, la creación de puestos de trabajo dentro de las cadenas de suministro sostenibles podría desempeñar un papel fundamental en el apoyo a la transición, ayudando a las economías locales no sólo a adaptarse, sino también, potencialmente, a crecer. La producción de petróleo y gas de México ha disminuido en los últimos años, pasando de representar más del 7% del PIB nacional en 2007 a aproximadamente el 2% en 2020. Si bien esto puede perturbar temporalmente las economías locales, puede abrir oportunidades aún mayores para crear localmente las capacidades que exigirán los nuevos puestos de trabajo a prueba de futuro, aportando un desarrollo significativo al país y fomentando las economías verdes en torno a los puertos y más allá. Este desarrollo y la afluencia de recursos tienen el potencial de aliviar o agravar significativamente algunos de los principales problemas existentes en el país – incluyendo la pobreza y la desigualdad, que también se han destacado como posibles barreras para el desarrollo sostenible del país [30] –, lo que subraya la necesidad de aplicar directrices para asegurar una transición justa en beneficio de todos.

Esto incluye una serie de funciones laborales, niveles de cualificación y requisitos de educación, e incluye roles en la generación y el transporte de energías renovables, la generación, el almacenamiento y la manipulación de combustibles, la investigación y la fabricación de soluciones tecnológicas relacionadas, como las celdas de combustible.

Aprovechar la demanda mundial de productos y materias primas verdes

El hidrógeno verde podría ser una valiosa mercancía de exportación que el país podría suministrar a diversos mercados mundiales, por ejemplo a Estados Unidos, Japón y Europa Occidental [31]. Otros países de América del Sur también podrían convertirse en compradores buscando satisfacer su demanda interna o redistribuir y exportar en el futuro, como podría ser el caso de Panamá [32]. Una adopción temprana de los combustibles cero carbono en México podría establecer al país como líder mundial en su producción y podría alimentar estos mercados, beneficiándose de su ubicación en las principales rutas marítimas, así como diversificando la industria marítima a través de la descarbonización de los cruceros.

La producción de hidrógeno y amoníaco verde también posicionaría a México para alimentar una creciente demanda mundial de productos “verdes”. A medida que el mercado de los productos y materiales vea una creciente demanda de opciones con cero emisiones de carbono, México estará en ventaja al poder ofrecerlos a los mercados internacionales.

Del mismo modo, la producción de acero y cemento verde, por medio de hidrógeno verde, podría proporcionar un producto básico que alimentaría directamente a estos crecientes mercados verdes. Los productores de cemento han hecho avances significativos hacia la adopción del hidrógeno en sus operaciones [33], y los productores de acero ya están participando activamente en este diálogo a través de las asociaciones locales de hidrógeno, lo que podría llevar a México a aprovechar con éxito ésta y otras oportunidades en tecnologías y bienes de combustible de cero emisiones de carbono.

Un catalizador para la descarbonización de la economía de México

La inversión en electricidad renovable, combustibles con cero emisiones de carbono e infraestructura sostenible puede apoyar la descarbonización de la economía de México mucho más allá del transporte marítimo. El establecimiento de la generación renovable para los combustibles del transporte marítimo a escala dentro de México ayudará a establecer fuertes cadenas de suministro, desarrollando habilidades y experiencia con estas tecnologías, y generando economías de escala que apoyarán una adopción más amplia de las tecnologías renovables para el suministro de energía nacional. La demanda de energía procedente de la generación de combustibles con cero emisiones de carbono es muy adecuada para apoyar la inversión en generación renovable sin restricciones, ya que la producción de combustible puede proporcionar flexibilidad para el equilibrio de la red directamente desde la infraestructura renovable.

Además, la disponibilidad de combustibles con cero emisiones de carbono puede utilizarse para descarbonizar otros sectores; el hidrógeno verde y el amoníaco pueden utilizarse para sustituir los combustibles fósiles y los materiales con alto contenido de carbono en el transporte pesado, la minería, la agricultura, la fabricación y la industria. Esto puede lograrse con la colaboración de la Asociación Mexicana de Hidrógeno, el grupo mexicano de hidrógeno formado en 2021, que reúne a empresas de energía, grupos comerciales de energía y organismos con el objetivo de promover una industria del hidrógeno en México mediante la articulación de estrategias y acciones [10].

Atraer la inversión extranjera y privada

El despliegue de las energías renovables a gran escala y la construcción de la infraestructura, las cadenas de suministro y las capacidades necesarias para hacer posible la economía de los electrocombustibles en México y aprovechar los beneficios que traerían, requerirá de importantes volúmenes de inversión. Se pueden atraer entre 36.7 y 52.8 mil millones de pesos mexicanos de inversiones para infraestructura en tierra si se adoptaran sistemas de propulsión de electrocombustibles en los puertos de México. La naturaleza de estos proyectos y los co-beneficios asociados para la industria significarían que la financiación climática internacional junto con las asociaciones con el sector privado nacional e internacional pueden ser apalancadas y pueden desempeñar un papel clave no sólo en el suministro del capital necesario, sino también en su asignación efectiva, ayudando a impulsar el avance de la sostenibilidad y el sector energético local.

Este estudio destaca la potencial oportunidad de inversión que tiene México en la producción de combustibles marítimos con cero emisiones de carbono. Actualmente no se sabe con certeza qué impactos tendrá la reciente Reforma Energética en términos de desarrollar a México como un centro de combustibles de cero carbono [34]. Sin embargo, la aplicación de las políticas, los incentivos y el diseño del mercado adecuados, junto con el respaldo adicional de la financiación pública, pueden crear un entorno sólido en el que los proyectos en México puedan prosperar desde etapas tempranas. La futura demanda de combustibles con cero emisiones de carbono permitirá aumentar las exportaciones y puede proporcionar un flujo de ingresos constante a largo plazo, lo que constituye un aspecto atractivo para la inversión y puede ayudar a México a alcanzar sus objetivos de emisiones, así como a crear nuevos empleos verdes.

El hecho de que México se convierta en el primero en generar y suministrar combustibles con cero emisiones de carbono en un mercado global supondrá que se convierta en un país atractivo para la inversión extranjera. La capacidad de suministrar combustibles con cero emisiones de carbono hará que México esté bien posicionado para el comercio y la cooperación con otros países que también están estableciendo combustibles con cero emisiones de carbono, potencialmente en Asia, África, América del Sur, del Norte y Central y Europa, lo que juega a favor de la ventaja geográfica de México.

Precios del hidrógeno

Aunque el precio del hidrógeno verde sigue siendo elevado, se espera que descienda significativamente con el tiempo gracias a la disminución del coste de las energías renovables, las curvas de aprendizaje de la industria y la reducción de los precios de las tecnologías de producción de hidrógeno, hasta alcanzar los 1.40 dólares estadounidenses por kg HHV en 2030 [35]. Hay preocupaciones de que las subvenciones existentes para los combustibles fósiles en México puedan hacer que las inversiones en energías renovables parezcan artificialmente poco atractivas. Los países del G20, incluido México, han acordado eliminar gradualmente las subvenciones a los combustibles fósiles.

Por lo tanto, esta situación puede hacer que los precios al por menor de la electricidad aumenten considerablemente para ciertos segmentos de consumidores una vez que se eliminen los subsidios, momento en el que el país podría encontrarse en una posición de alta dependencia energética y precios elevados, al no tener suficiente capacidad renovable local que se habría construido con el tiempo si no fuera por los subsidios a los combustibles fósiles.

Preservación del medio ambiente

Las tecnologías y los combustibles utilizados actualmente para el transporte marítimo son perjudiciales para el clima y el medio ambiente a gran escala, pero también tienen importantes repercusiones locales que a menudo se pasan por alto. El impacto en la contaminación del aire, que a su vez repercute en la salud de la flora, la fauna y las personas, puede ser significativo. Esto tiene una gran importancia por sí solo, pero se vuelve especialmente crucial en varios lugares de México donde las economías locales, a menudo centradas en el turismo y los servicios relacionados, pueden verse afectadas adicionalmente por la pérdida de biodiversidad y ecosistemas que son el centro de su economía. Además, las molestias y los posibles problemas de salud relacionados con la contaminación del aire pueden desincentivar a los visitantes, lo que agrava aún más el problema. La lucha contra las emisiones y la contaminación del transporte marítimo se convierte entonces no sólo en una cuestión de prevención del cambio climático y de reducción del impacto ambiental, sino también de salud y de prevención de la perturbación de las economías locales.



Conclusiones

Con su excelente potencial renovable, su posición clave a lo largo de las principales rutas marítimas y sus amplias relaciones comerciales, México podría aprovechar el impulso de la descarbonización del transporte marítimo internacional para poder ofrecer abastecimiento de combustible con cero emisiones de carbono a las naves que visiten los puertos del país, creando potencialmente un nuevo producto de exportación y desarrollando su propia economía del hidrógeno. Esto supondría importantes beneficios para la economía y la sociedad a medida que surja esta nueva industria sostenible, creando puestos de trabajo y desarrollando cadenas de suministro.



A medida que el mundo toma medidas contra el cambio climático, México podría atraer inversiones extranjeras y privadas a través de la financiación internacional, lo que presentaría oportunidades para que las empresas locales crezcan y desarrollen habilidades y conocimientos. El desarrollo de la infraestructura de combustibles de cero emisiones podría atraer una inversión de entre 36.7 y 52.8 mil millones de pesos mexicanos.

Esta expansión podría ser sostenida por la demanda de las compañías navieras internacionales a medida que aumente la adopción de los combustibles con cero emisiones de carbono en los próximos años. Esto depende de que el gobierno mexicano ponga en marcha las políticas adecuadas a nivel nacional y apoye una política global ambiciosa en la IMO.

La producción de combustibles con cero emisiones de carbono requiere cantidades significativas de electricidad renovable. La infraestructura de electricidad renovable para el suministro de combustible marítimo debe desarrollarse por encima de la desarrollada para satisfacer los requisitos de la red, para garantizar el apoyo a los objetivos de descarbonización de México. Esta demanda, especialmente de energía eólica y solar, impulsará el desarrollo de las cadenas de suministro y habilitará economías de escala, apoyando una mayor adopción de la infraestructura renovable, y permitiendo a México capitalizar su excelente potencial renovable.

Con unos objetivos tan cruciales y ambiciosos, y teniendo en cuenta las piezas clave – y los grandes volúmenes de inversión – que deben confluir para alcanzarlos, la coordinación y la planificación a largo plazo serán cruciales. Por ello, México podría beneficiarse enormemente del establecimiento de una hoja de ruta exhaustiva y del envío de señales claras desde el principio. Esto permitiría que las inversiones, las infraestructuras y los mercados crecieran y evolucionen a buen ritmo para permitir que las economías locales de electrocombustibles con cero emisiones de carbono alcancen a tiempo estos objetivos y que México aproveche este próximo cambio de mercado.

Así como México tiene grandes perspectivas de beneficiarse de esta manera, hay oportunidades similares para otras naciones en América del Sur y Central y en todo el mundo. Los pioneros se establecerán desde temprano como centros de abastecimiento de combustible con cero emisiones de carbono y se posicionarán como líderes en el nuevo mundo del transporte marítimo descarbonizado.

Potencial de sinergias y cooperación con los países vecinos

Los beneficios descritos en este informe no se limitan a México, y una adopción más amplia y regional de los combustibles con cero emisiones de carbono apoyaría las rutas comerciales y los co-beneficios regionales, además de apoyar y ayudar a acelerar la transición del país hacia bajas emisiones de carbono. El mapa que figura a continuación ofrece algunos ejemplos adicionales de puertos que tienen potencial para beneficiarse de la descarbonización de la actividad marítima. Hay muchos más puertos en la región que podrían beneficiarse de forma similar.

Casos de estudio portuarios en México

Esta sección se sumerge en tres categorías portuarias representativas del tipo de puertos que se pueden encontrar en otros lugares de México: puertos grandes y concurridos, puertos más pequeños a lo largo de las rutas marítimas y puertos centrados en la exportación a lo largo del Golfo de México. La sección investiga casos de estudio para cada una de estas categorías de puertos, mostrando que son adecuados para habilitar los mercados locales de electrocombustibles y que otros puertos similares en México que potencialmente podrían seguir su ejemplo.

Manzanillo:

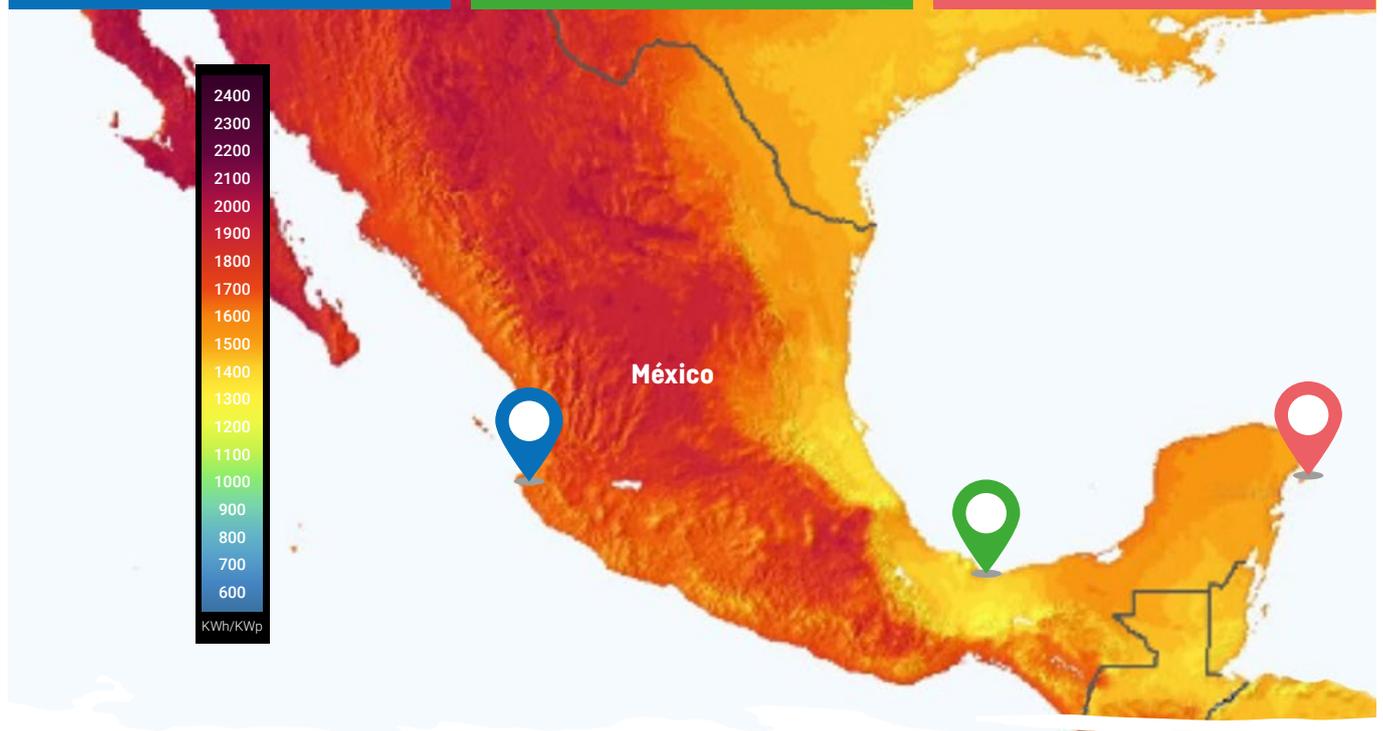
El puerto más activo de México. Este puerto emblemático maneja grandes cantidades de importaciones y exportaciones y tiene un importante potencial renovable. Los electrocombustibles producidos localmente podrían exportarse a otros puertos vinculados y establecer a Manzanillo como una pieza importante en las cadenas de suministro internacionales de bajas emisiones de carbono.

Coatzacoalcos:

Una de las piezas centrales en la logística petrolera en México. Dotado de considerables recursos locales, puede convertirse en una fuente de ingresos a prueba de futuro y crear considerables capacidades locales, incluso a medida que las materias primas de los combustibles fósiles se vayan eliminando a nivel internacional.

Cozumel:

Este famoso destino turístico es mundialmente reconocido por sus playas y su biodiversidad. La habilitación local de electrocombustibles aquí puede ser un sólido caso de negocio gracias al denso y constante tráfico y ayudar a preservar los preciosos recursos y la calidad del aire en el corazón de su turismo.





Estudio de caso portuario

Los puertos de gran actividad que gestionan la importación y exportación de mercancías tienen la oportunidad de poder ofrecer combustibles con cero emisiones de carbono a un mercado creciente de productos descarbonizados

Se prevé un aumento de la demanda de servicios de transporte marítimo bajos en carbono y respetuosos con el medio ambiente, ya que los fabricantes de mercancías quieren ofrecer a sus clientes opciones ecológicas. Poder ofrecer combustibles con cero emisiones de carbono como opción de recarga de combustible para los primeros que los adopten situará a los puertos de contenedores y transportistas, que tratan con mercancías y materiales, en una posición de mercado ventajosa.

Descripción de la categoría de los puertos

Habrà una creciente demanda de servicios de transporte marítimo con bajas emisiones de carbono y respetuosos con el medio ambiente, ya que los fabricantes de mercancías quieren ofrecer a sus clientes opciones respetuosas con el medio ambiente. El transporte marítimo forma parte de esta historia, ya que cada vez se habla más de los impactos ambientales del ciclo de vida, y crecen las expectativas sobre los proveedores de productos en cuanto al abastecimiento y el transporte ético de bienes y materiales. La capacidad de ofrecer combustibles con cero emisiones de carbono como opción de abastecimiento de combustible para los primeros en adoptarlos situará a los puertos de contenedores y transportistas, que tratan con mercancías y materiales, en una posición ventajosa en el mercado.

Los puertos que desarrollen la capacidad de producción y abastecimiento de combustible con cero emisiones de carbono también podrían ofrecer el abastecimiento de combustible a las naves internacionales que recorren largas distancias y a los que visitan puertos que no ofrecen los combustibles con cero emisiones que necesitan las naves, aumentando así la demanda y generando ingresos adicionales. Otras embarcaciones que utilizan estos puertos, incluidas las naves más pequeñas, los servicios de altamar y los transportes de vehículos y personas (transbordadores), podrían beneficiarse de la infraestructura de combustibles con cero emisiones de carbono que se está desarrollando en el puerto al operar con estos combustibles. Más allá de esto, si las naves son adecuadas, podrían adoptar sistemas de baterías y de carga para funcionar junto a las naves de hidrógeno y amoníaco.



El enfoque y la estrategia para desarrollar la capacidad de abastecimiento de combustible con cero emisiones para un puerto específico dependerá del potencial renovable de la zona, incluidas las opciones en tierra y en el mar. Estas tecnologías de generación de energía renovable podrían alimentar directamente la producción de combustible con cero emisiones de carbono o podrían conectarse a la red eléctrica más amplia con un acuerdo de suministro y transmisión independiente para el suministro de la instalación de producción. Esto significa que la infraestructura de generación no necesita estar ubicada junto con la infraestructura de producción y el puerto, lo cual es una opción útil para los puertos ubicados en zonas urbanas, o con poco potencial renovable en las cercanías. Aunque este enfoque es posible, debería favorecerse la producción local siempre que sea factible, ya que daría lugar a menos pérdidas, reduciría el riesgo de fugas y disminuiría las emisiones y los costes asociados al transporte y al almacenamiento.

Ejemplo de puerto: Puerto de Manzanillo

El puerto de Manzanillo es uno de los más activos de México en el manejo de carga del Océano Pacífico. Está situado en la costa oeste de México y tiene conexiones con 74 puertos internacionales de Asia, Europa del Este, Australia, Norteamérica y Sudamérica. Estos destinos podrían convertirse en objetivos para la exportación de electrocombustibles producidos localmente y podrían desempeñar un papel para permitir el transporte marítimo con cero emisiones de carbono entre estos destinos. Este puerto maneja cantidades significativas de bienes generales y de consumo, un mercado que se espera que demande cada vez más soluciones descarbonizadas.

El tráfico principal de este puerto incluye graneleros, petroleros y portacontenedores. En cuanto a las necesidades de combustible, el 70% de la energía requerida por el puerto se atribuye a los portacontenedores, mientras que los graneleros y los petroleros representan otro 27% de la energía requerida. El consumo anual de energía de las naves que visitan el puerto de Manzanillo es de 11.1 TWh/año. Una futura economía local de electrocombustibles podría aprovechar el vasto recurso solar del que gozan el puerto y sus regiones circundantes, aprovechándolo para abastecer a la flota de cero emisiones de carbono del futuro. Ello podría reportar enormes beneficios a la región y a las economías locales y contribuir a la descarbonización del sector marítimo y, mediante el apoyo a las energías renovables, también de la red eléctrica.

La producción de combustibles con cero emisiones de carbono podría convertirse en una vía para exportar estos combustibles a los puertos internacionales asociados al Puerto de Manzanillo, junto con oportunidades para que el puerto se convierta en un punto de recarga de combustible para varias rutas.

Ilustración 12: Demanda energética de naves que parten del puerto de Manzanillo (TWh)



Caso de estudio portuario

Los puertos más pequeños de México podrían tener una oportunidad considerable de desarrollarse a medida que se implementan los combustibles de cero emisiones de carbono

Los puertos más pequeños cercanos a las rutas marítimas más transitadas podrían desarrollar la capacidad de ofrecer oportunidades de abastecimiento de combustible con cero emisiones de carbono a las naves más grandes que los transiten. Esto puede ser un factor vital para la adopción de combustibles que son menos densos en energía y que, por lo tanto, requieren que las naves hagan más paradas para abastecerse de combustible. Las naves más pequeñas a las que sirven estos puertos pueden ser adecuadas para adoptar tecnologías de baterías cargadas con energía renovable.

Descripción de la categoría del puerto

Muchas de las embarcaciones que visitan los puertos más pequeños de México pueden ser adecuadas para adoptar tecnologías de baterías (barcos de pesca más pequeños, transbordadores y embarcaciones de propiedad individual). La adopción de estas tecnologías puede ser gradual, con la compra de nuevas embarcaciones de batería a medida que las embarcaciones más antiguas se vuelven costosas de reparar y sean reemplazadas. Por lo tanto, la infraestructura de recarga en tierra será necesaria en una fase temprana, pero puede ampliarse con el tiempo.

Las naves más grandes que recorren distancias más largas son más adecuadas para un combustible de cero emisiones de carbono en forma de hidrógeno verde y amoníaco. Estos combustibles tienen una menor densidad energética que los combustibles fósiles para el transporte marítimo, y es probable que se necesiten paradas más frecuentes para el abastecimiento de combustible.



Los puertos podrían beneficiarse de formar parte de una red más amplia de puertos que suministren combustibles de cero emisiones, permitiendo que las naves que hacen muchas paradas en su viaje los adopten. Algunos de estos puertos también pueden tener el potencial de expandirse, proporcionando abastecimiento de combustible para puertos más grandes, o incluso produciendo combustibles de cero emisiones para exportación al mercado mundial. Esto podría representar un importante beneficio económico para el puerto y su zona circundante. Podría existir una vía hacia la adopción de combustibles con cero emisiones de carbono, que podrían producirse localmente o transportarse desde otros lugares de México o más allá.

Ejemplo de puerto: El puerto de Cozumel

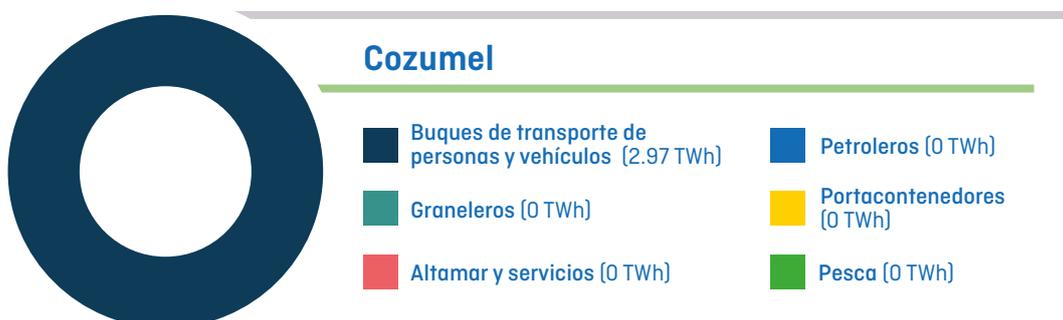
El puerto de Cozumel da servicio a la isla más grande de México. Cozumel está situado en la costa sureste de México, cerca de Cuba, Guatemala y Honduras.

El tráfico de personas y vehículos constituye una gran parte del tráfico portuario, siendo en su mayoría cruceros y transbordadores. En cuanto a las necesidades energéticas de las naves del puerto, casi el 99% se atribuye a las naves de transporte de personas y vehículos (principalmente cruceros), mientras que los servicios de altamar, los pequeños graneleros y las naves pesqueras representan el ~2% restante. La demanda energética global del puerto es de unos 2.97 TWh/año, lo que podría representar una gran oportunidad si las naves comenzaran a cambiar a los electrocombustibles: el considerable potencial solar fotovoltaico presente en la zona y las favorables velocidades del viento que se registran en la costa podrían aprovecharse para producir electrocombustibles localmente, lo que habilitaría una considerable descarbonización, una nueva economía local y una fuente de ingresos a prueba de futuro.

Mientras tanto, toda la capacidad renovable instalada en el lugar puede utilizarse para abastecer a buques más pequeños, como los transbordadores que se desplazan entre la isla y tierra firme y que son más adecuados para la electrificación. Esta descarbonización global puede ayudar sustancialmente a preservar las economías y los ecosistemas locales – clasificados como reserva de la biosfera por la UNESCO [36] – al reducir la contaminación atmosférica y la acidificación de los océanos. El funcionamiento más silencioso de las naves electrificadas también reduciría el ruido, lo que supondría un alivio adicional para la fauna local. Estos ecosistemas locales son el corazón de la economía local, altamente turística, y no actuar podría resultar perjudicial no sólo para ellos, sino también para la economía local.

Aunque es probable que las baterías sean adecuadas para abastecer de combustible a las naves más pequeñas que visitan este puerto, las naves de pesca y de servicios en altamar más grandes que abastecen a la isla podrían ser una vía potencial para utilizar combustibles con cero emisiones de carbono. Podrían establecerse instalaciones de bunkering para combustibles con cero emisiones de carbono en el puerto de Cozumel para abastecer de combustible a los cruceros que recorren esta ruta.

Ilustración 13: Demanda energética de naves que parten del puerto de Cozumel (TWh)



Caso de estudio portuario

Los combustibles con cero emisiones de carbono podrían facilitar la transición hacia oportunidades de exportación verde en el Golfo de México y más allá

Hay varios puertos en México, especialmente en el Golfo de México, que tienen importantes exportaciones en todo el mundo. Esto incluye las exportaciones de combustibles fósiles como el petróleo, que se espera que disminuyan con el movimiento global hacia opciones bajas en carbono. Los combustibles con cero emisiones de carbono suponen una importante oportunidad de transición hacia economías verdes y preparadas para el futuro.

Descripción de la categoría de puertos

Hay varios puertos en México, especialmente en el Golfo de México, que tienen importantes exportaciones en el mundo, incluidas las exportaciones de combustibles fósiles como el petróleo y el gas. A medida que aumente la demanda mundial de opciones con menos emisiones de carbono, se espera que las exportaciones de combustibles fósiles y de altas emisiones de carbono disminuyan, poniendo en riesgo estos puertos y las comunidades y economías que dependen de ellos.

La producción y el suministro de combustibles con cero emisiones de carbono podría ser una oportunidad importante para la transición hacia economías verdes y preparadas para el futuro. La oferta de oportunidades de abastecimiento de combustible con cero emisiones de carbono o la exportación de éstos a los crecientes mercados mundiales podría aportar ingresos vitales a la zona local, al tiempo que apoyaría la descarbonización del sector marítimo de México.



El desarrollo de la infraestructura de combustibles de cero emisiones de carbono también podría ser una oportunidad para desarrollar otros productos y bienes de bajo carbono: la infraestructura de electricidad renovable podría alimentar la industria local, y los propios combustibles de emisiones cero podrían aprovecharse para descarbonizar procesos industriales como la fabricación de acero, proporcionar fertilizantes para la agricultura o combustible para la maquinaria pesada. Los puertos también podrían servir para exportar otros bienes descarbonizados más allá del propio combustible, proporcionando más oportunidades económicas.

Ejemplo de puerto: Puerto de Coatzacoalcos

Coatzacoalcos es un puerto exportador de productos petroleros que está bien conectado por ferrocarril y carretera con el centro de México y la costa del Pacífico. Otros productos de exportación de este puerto incluyen productos agrícolas, forestales y manufacturados. El puerto está situado en el Golfo de México, en la costa este. En esta región existe un importante foco de exploración petrolera, con grandes exportaciones de petróleo en los puertos vecinos.

El tráfico de buques en Coatzacoalcos está dominado por los buques cisterna y los graneleros, que juntos consumen más del 90% de la necesidad total de energía de las naves que salen del puerto, que asciende a un total de unos 0.857 TWh/año. Aunque el recurso solar alrededor del puerto no es el más alto del país – aunque sigue siendo considerable, con ~1,580 kWh/kWp, comparado con los ~1,750 kWh/kWp alrededor de Manzanillo [37] –, las zonas circundantes presentan un alto potencial eólico que podría aprovecharse no sólo para producir electrocombustibles para satisfacer esta demanda de combustible de las naves, sino también para potencialmente exportarlos. Los graneleros representan la mayor parte de las necesidades energéticas de los puertos, con un 82% de la energía total.

Ilustración 14: Demanda energética de naves que parten del puerto de Coatzacoalcos (TWh)



Los combustibles con cero emisiones de carbono podrían convertirse en un producto de exportación en Coatzacoalcos, junto con el potencial de abastecimiento de combustible. Habría que explorar el potencial de la energía eólica marina para permitir el establecimiento de instalaciones de abastecimiento de combustible de cero emisiones de carbono en la región. También se podría aprovechar la infraestructura local, lo que ayudaría no sólo a reforzar el caso de negocio para las inversiones en electrocombustibles con cero emisiones de carbono, sino también a rescatar potencialmente una parte de los activos existentes. Los gasoductos, por ejemplo, podrían utilizarse para transportar e incluso exportar hidrógeno a través de la mezcla, y la capacidad de generación podría readaptarse para la generación de energía y la seguridad del suministro.

Ejemplo de puerto: Puerto de Dos Bocas

El puerto de Dos Bocas se centra sobre todo en el petróleo, ya que maneja más del 85% de la producción del país [38]. También se exportan por este puerto diversos productos alimenticios, como varias frutas, caña de azúcar y café, que sirven a los estados mexicanos más cercanos a Guatemala (Tabasco, Chiapas y Campeche). El puerto en sí está situado en la orilla sur del Golfo de México, en el Estado de Tabasco.

Dada la gran actividad relacionada con el petróleo, gran parte de la demanda energética de las naves (más del 85% de los 1.53 TWh de demanda energética anual) corresponde a los buques cisterna y a las naves de servicios en altamar que apoyan las operaciones petroleras en la región, mientras que los graneleros y los buques representan una pequeña parte de la demanda energética local.

El recurso solar local es relativamente alto, con una producción de ~1,650 kWh/kWp de energía solar fotovoltaica [39], y la velocidad del viento es prometedora, con más de 7 m/s (media anual) en la costa y más allá de ella [40]. A medida que el mundo se aleja de los combustibles fósiles, se espera que las operaciones y el tráfico en el puerto disminuyan, pero el considerable potencial renovable que se encuentra en la región presenta una oportunidad para la producción local de electrocombustibles que puede utilizarse para abastecer a los barcos, o incluso para exportar, dada la ubicación del puerto y las rutas comerciales establecidas que dependen de él. Esto puede proporcionar un impulso inicial significativo hacia el establecimiento de rutas de transporte marítimo con cero emisiones de carbono y sentar las bases para que las economías locales estén preparadas para las etapas más aceleradas de la transición que se esperan después de 2030.

Ilustración 15: Demanda energética de naves que parten del puerto de Dos Bocas (TWh)





Referencias

- [1] SGN, "Aberdeen Vision," 2021. [En línea]. Disponible: <https://sgn.co.uk/about-us/future-of-gas/hydrogen/aberdeen-vision>. [Consultado el 17 de julio de 2021].
- [2] Networks, "Could hydrogen piggyback on natural gas infrastructure?," 17 de marzo de 2016. [En línea]. Disponible: <https://networks.online/gas/could-hydrogen-piggyback-on-natural-gas-infrastructure/>. [Consultado el 17 de julio de 2021].
- [3] N. Ash and T. Scarbrough, "Sailing on Solar - Could green ammonia decarbonise international shipping?," Environmental Defense Fund, Londres, 2019.
- [4] N. Ash, I. Sikora and B. Richelle, "Electrofuels for shipping: How synthetic fuels from renewable electricity could unlock sustainable," Environmental Defense Fund, Londres, 2019.
- [5] IEA, "Mexico Country Profile," 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.iea.org/countries/mexico>. [Consultado el 27 de junio de 2021].
- [6] Forbes, "Political Risk Analysis: Is Mexico Declaring War Against Clean Energy?," 2021 April 22.
- [7] Secretaría de la Gobernación, "DOF: 24/03/2021," 2021 22 de marzo. [En línea]. Disponible: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5614425&fecha=24%2F03%2F2021. [Consultado el 30 de julio de 2021].
- [8] IRENA, "Renewable Energy Prospects: Mexico," mayo de 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.irena.org/publications/2015/May/Renewable-Energy-Prospects-Mexico>. [Consultado el 27 de junio de 2021].
- [9] Statista, "Mexico: Distribution of the gross domestic product (GDP) across economic sectors from 2009 to 2019," [En línea]. Disponible: <https://www.statista.com/statistics/275420/distribution-of-gross-domestic-product-gdp-across-economic-sectors-in-mexico/>. [Consultado el 27 de junio de 2021].
- [10] C. Lenton, "Mexico seeking to joining Latin American peers in hydrogen push," Natural Gas Intelligence, 2021.
- [11] Business Wire, "Air Liquide Signs a Long Term Contract with PEMEX for the Supply of Hydrogen to the Tula Refinery in Mexico," 6 de septiembre de 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.businesswire.com/news/home/20170906006265/en/Air%C2%AOLiquide-Signs-a-Long-Term-Contract-with-PEMEX-for-the-Supply-of-Hydrogen-to-the-Tula-Refinery-in-Mexico>. [Consultado el 11 de julio de 2021].
- [12] CMS, "Hydrogen law and regulation in Mexico," CMS, 7 de octubre de 2020. [En línea]. Disponible: <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/mexico>. [Consultado en junio de 2021].

- [13] A. Duhalt, "The Urea Value Chain in Mexico: From Natural Gas Supply to Imports of Basic Food Staples," Baker Institute, 2018.
- [14] ABS, "Ammonia as Marine Fuel," American Bureau of Shipping, Spring, Texas, 2020.
- [15] Korean Register, "Forecasting the Alternative Marine Fuel - Ammonia," Korean Register, Busan, 2020.
- [16] DNV, "Ammonia as a Marine Fuel: Safety Handbook," DNV, Bærum, 2021.
- [17] Lloyd's Register, "First LR classed hydrogen-powered vessel launched," Lloyd's Register, 20 de diciembre de 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.lr.org/en-gb/latest-news/first-lr-classed-hydrogen-powered-vessel-launched/>. [Consultado el 16 de abril de 2021].
- [18] H2 México, "Impulsamos la Industria del Hidrógeno en México", 2021. [En línea]. Disponible: <https://h2mex.org/en/>. [Consultado el 30 de julio de 2021].
- [19] A. Trevisan y B. Rogers, "Fuel Focus - Ammonia," en Ship.Energy Summit 2021, En línea, 2021.
- [20] J. J. Minnehan y J. W. Pratt, "Practical application limits of fuel cells and batteries for zero emission vessels", SANDIA Report: SAND2017-12665., Albuquerque, NM, 2017.
- [21] The World Bank, "Mexico Overview," 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.worldbank.org/en/country/mexico/overview>. [Consultado en mayo de 2021].
- [22] World Bank, "Mexico Trade Statistics," 2018. [En línea]. Disponible: <https://wits.worldbank.org/CountryProfile/en/Country/MEX/Year/2018/TradeFlow/EXPIMP/Partner/WLD/Product/All-Groups>.
- [23] World Ports Source, "Puerto de Manzanillo," 2021. [En línea]. Disponible: http://www.worldportsource.com/ports/commerce/MEX_Puerto_de_Manzanillo_234.php. [Consultado el 14 de julio de 2021].
- [24] Secretaría de Energía, "Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional", México, 2021.
- [25] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Gobierno de México, "Nationally Determined Contributions (Update)," 2020.
- [26] Climate Action Tracker, "Climate Action Tracker (Mexico)," [en línea]. Disponible: <https://climateactiontracker.org/countries/mexico/pledges-and-targets/>. [Consultado en mayo de 2021].
- [27] Secretaría Nacional de Energía, "Prospectiva de Energías Renovables", Ciudad de México, 2016.
- [28] University College London, 2018.

- [29] Mission Innovation, “Zero-Emission Shipping,” 2021. [En línea]. Disponible: <http://www.mission-innovation.net/missions/shipping/>. [Consultado el 17 de julio de 2021].
- [30] M. D. J. F. [THOMAS HIRSCH, “Guiding Principles & Lessons Learnt For a Just Energy Transition in the Global South”, Friedrich Ebert Stiftung, Alemania, 2017.
- [31] T. Roos y J. Wright, “Powerfuels and Green Hydrogen (public version)”, EU-South Africa [EU-SA] Partners for Growth, EuropeAid/139363/DH/SER/MULTI, 2021.
- [32] Secretaría Nacional de Energía de Panamá, “PANAMÁ PROMUEVE CENTRO DE DISTRIBUCIÓN DE HIDRÓGENO PARA LA REGIÓN”, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.energia.gob.pa/panama-promueve-centro-de-distribucion-de-hidrogeno-para-la-region/>. [Consultado el 1 de julio de 2021].
- [33] CEMEX, “CEMEX successfully deploys hydrogen-based ground-breaking technology”, 22 de febrero de 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.cemex.com/-/cemex-successfully-deploys-hydrogen-based-ground-breaking-technology>. [Consultado el 17 de julio de 2021].
- [34] S&P Global Platts, “Mexico’s energy sector stagnates as AMLO’s counter-reform plays out”, 24 de marzo de 2021.
- [35] Bloomberg New Energy Finance, “Hydrogen’s Plunging Price Boosts Role as Climate Solution”, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-08-21/cost-of-hydrogen-from-renewables-to-plummet-next-decade-bnef>. [Consultado el 17 de julio de 2021].
- [36] UNESCO, “Sila Cozumel”, 2021. [En línea]. Disponible: <http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/ecological-sciences/biosphere-reserves/latin-america-and-the-caribbean/mexico/isla-cozumel/#:~:text=The%20Isla%20Cozumel%20Biosphere%20Reserve,the%20city%20of%20San%20Miguel>. [Consultado el 2021 de julio de 15].
- [37] World Bank Group, “Solar GIS”, [en línea]. Disponible: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/overview>. [Consultado el 1 de julio de 2021].
- [38] World Ports Source, “Puerto de Dos Bocas”, 2021. [En línea]. Disponible: http://www.worldportsource.com/ports/review/MEX_Puerto_de_Dos_Bocas_1510.php. [Consultado el 17 de julio de 2021].
- [39] World Bank Group, “Global Solar Atlas”, 2021. [En línea]. Disponible: <https://globalsolaratlas.info/map>. [Consultado el 17 de julio de 2021].
- [40] World Bank Group, “Global Wind Atlas”, 2021. [En línea]. Disponible: <https://globalwindatlas.info/>. [Consultado el 17 de julio de 2021].
- [41] Secretaría de Energía, “Prospectiva de Energías Renovables 2016 -2030”, SENER, México, 2016.
- [42] <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=MEXICO&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel>

- [43] UCL Energy Institute y UMAS, "Private Conversations with UCL and UMAS International around South Africa's maritime activities and emissions," Londres, 2021.
- [44] IEA, "The Future of Hydrogen ", Agencia Internacional de la Energía, París, 2019.
- [45] N. Rehmatulla, P. Piris-Cabezas, D. Baresic, M. Fricaudet, C. Raucci, M. Cabbia Hubatova, A. O'Leary, N. Stamatiou y A. Stratton, "Exploring the relevance of ICAO's Sustainable Aviation Fuels framework for the IMO", Environmental Defense Fund, Londres, 2020.
- [46] BEIS, "Greenhouse gas reporting: conversion factors 2020", Department for Business, Energy and Industrial Strategy, 9 de junio de 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reportingconversion-factors-2020>.
- [47] IEAGHG, "Techno-Economic Evaluation of SMR Based Standalone (Merchant) Hydrogen Plant with CCS", IEA Environmental Projects Ltd, Cheltenham, 2017.
- [48] D. Schlissel, "Boundary Dam 3 Coal Plant Achieves Goal of Capturing 4 Million Metric Tons of CO2 But Reaches the Goal Two Years Late", Institute for Energy Economics and Financial Analysis, Lakewood, 2021.
- [49] P. Balcombe, K. Anderson, J. Speirs, N. Brandon y A. Hawkes, "Methane and CO2 emissions from the natural gas supply chain", Imperial College London, Londres, 2015.

Apéndices



Apéndice A: Presentación de los supuestos y resultados del análisis multicriterio de los combustibles marítimos con cero y bajas emisiones de carbono

Como parte de este proyecto, se llevó a cabo un análisis multicriterio para comparar los puntos fuertes y débiles de varios combustibles con cero y bajas emisiones de carbono. Este análisis se llevó a cabo a un alto nivel para informar el desarrollo del material en el cuerpo principal del informe, y no pretende representar una evaluación numérica detallada de los combustibles. Las tablas siguientes incluyen la puntuación de cada criterio y su ponderación para cada combustible, y exponen los resultados numéricos.

Puntuaciones: Criterio 1

Criterio 1: Cambio en el volumen de almacenamiento del combustible en comparación con los combustibles fósiles												
Combustibles	Graneleros grandes	Graneleros pequeños	Buques cisterna grandes	Cisternas pequeños	Portacontenedores grandes	Portacontenedores pequeños	Portadores de personas y Vehículos Grandes	Portadores de personas y Veh Pequeños	Altamar y Servicios	Pesca en altamar	Pequeña industria	Pequeña pesca
Hidrógeno verde	3	4	3	3	0	4	3	3	3	0	3	3
Amoniaco Verde	3	3	4	4	4	4	4	0	4	3	0	0
Metanol Verde	0	3	4	4	4	4	4	0	4	3	4	4
Hidrógeno Azul	3	3	3	3	4	4	4	0	4	0	3	3
Amoniaco Azul	3	3	4	4	4	4	4	0	4	3	0	0
Derivado de residuos	3	3	4	4	4	4	4	0	4	3	3	3
Biometanol derivado de residuos	0	3	4	4	4	4	4	0	4	3	3	3
Biodiésel derivado de residuos	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Baterías	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	4	4

Definición de calificación

Puntuación	Criterio 1
0	La densidad del combustible no es suficiente (se elimina del análisis)
1	No se utiliza
2	No se utiliza
3	Es necesario aumentar el almacenamiento / cambiar la estrategia de abastecimiento de combustible
4	No se requiere ningún cambio en los depósitos de combustible

Puntuación: Criterios 2 a 8

	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	Criterio 6	Criterio 7	Criterio 8
Combustibles	Compatibilidad con la infraestructura de almacenamiento de combustible existente	Estado actual de las tecnologías de las naves: Trenes de potencia	Eficiencia energética del pozo al tanque	Riesgo de fuga accidental en el medio ambiente	Riesgo de manipulación: NFPA704	Cambio climático: Cero emisiones de carbono	Coste nivelado en 2030 teniendo en cuenta la eficiencia del tren de potencia
Hidrógeno verde	1	2	2	4	1	4	2
Amoniaco Verde	2	1	2	2	2	4	2
Metanol Verde	3	3	1	3	3	4	1
Hidrógeno Azul	1	2	3	4	1	0	3
Amoniaco Azul	2	1	2	2	2	0	3
Derivado de residuos	3	4	3	3	2	2	3
Biometanol derivado de residuos	3	3	3	3	3	2	2
Biodiésel derivado de residuos	4	4	3	1	3	2	2
Baterías	3	3	4	4	4	4	4

Definición de la clasificación: Criterios 2 a 8

Puntuación	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	Criterio 6	Criterio 7	Criterio 8
0	No se utiliza	No se utiliza	No se utiliza	No se utiliza	No se utiliza	Emisiones del ciclo de vida > 50% de emisiones del diésel	No se utiliza
1	Necesita desarrollo tecnológico	La tecnología está en fase de I+D	$X \leq 50\%$	El daño es grave y duradero	Clasificación de salud NFPA704 3; clasificación de inflamabilidad 4	No se utiliza	$X > 100 \text{ \$/MWh}$
2	Necesita cambios significativos. La tecnología está establecida	La tecnología está en fase de demostración	$50\% < X \leq 70\%$	El daño es duradero	Clasificación de salud NFPA704 3; clasificación de inflamabilidad ≤ 3	Emisiones del ciclo de vida < 50% de emisiones del diésel; emisiones en el punto de uso	$60 \text{ \$/MWh} < X \leq 100 \text{ \$/MWh}$
3	Necesita cambios. Tecnología establecida ya en uso	La tecnología está disponible comercialmente	$70\% < X \leq 90\%$	El daño es limitado en el tiempo o en la gravedad	Clasificación de salud NFPA704 ≤ 2 ; clasificación de inflamabilidad ≤ 3	No se utiliza	$30 \text{ \$/MWh} < X \leq 60 \text{ \$/MWh}$
4	Compatible - No se necesitan cambios	La tecnología está ampliamente adoptada	$X > 90\%$	Bajo riesgo para la vida marina o humana	Clasificación sanitaria NFPA704 = 0; clasificación de inflamabilidad ≤ 1	Emisiones del ciclo de vida < 50% de emisiones del diésel; sin emisiones en el punto de uso	$X \leq 30 \text{ \$/MWh}$

Factores de ponderación

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	Criterio 6	Criterio 7	Criterio 8
Combustibles	Cambio en el volumen de almacenamiento de combustible en comparación con los combustibles fósiles	Compatibilidad con la infraestructura de almacenamiento de combustible existente	Estado actual de las tecnologías de las naves: Trenes de potencia	Eficiencia energética del pozo al tanque	Riesgo de liberación accidental en el medio ambiente	Riesgo de manipulación: NFPA704	Cambio climático: Cero emisiones de carbono	Coste nivelado en 2030 teniendo en cuenta la eficiencia del tren de potencia
Hidrógeno verde	0.6	0.5	0.7	0.5	0.1	0.1	1	1
Amoníaco Verde	0.6	0.3	0.5	0.5	0.1	0.2	1	1
Metanol Verde	0.6	0.5	0.7	0.5	0.1	0.1	1	1
Hidrógeno Azul	0.6	0.3	0.5	0.5	0.1	0.2	1	1
Amoníaco Azul	0.6	0.8	0.7	0.5	0.1	0.1	1	1
Derivado de residuos	0.6	0.8	0.7	0.5	0.1	0.1	1	1
Biometanol derivado de residuos	0.6	0.3	0.7	0.5	0.1	0.2	1	1
Biodiésel derivado de residuos	0.6	0.3	0.5	0.5	0.1	0.5	1	1
Baterías	0.6	0.3	0.3	0.5	0.1	0.5	1	0.5

Las puntuaciones se calcularon como el producto de la calificación y los factores de ponderación para cada tecnología y tipo de nave. A continuación, se asignó una clasificación a cada una de ellas en orden descendente en función de estas puntuaciones finales (las puntuaciones más altas son las primeras en el orden de clasificación). De este modo, el análisis prioriza las tecnologías que inciden en el criterio más importante para cada tipo de buque.

Resultado de la clasificación

Combustibles	Graneleros		Petroteros		Contenedores	
	Grande	Pequeño	Grande	Pequeño	Grande	Pequeño
Hidrógeno Verde/Azul	3	4	5	5	N/A	5
Amoníaco Verde/Azul	4	5	4	4	4	5
Metanol Verde	N/A	6	6	6	5	7
Biometano derivado de residuos	1	1	1	1	1	2
Biometanol derivado de residuos	N/A	3	3	3	3	4
Biodiésel derivado de residuos	1	2	2	2	2	3
Baterías	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1

Combustibles	Vehículos de transporte de personas y vehículos		Pequeñas embarcaciones			
	Grandes	Pequeños	Alfamar y Servicios	Pesca	Industrial	Pesca/Pequeña
Hidrógeno Verde/Azul	5	2	6	N/A	6	6
Amoníaco Verde/Azul	4	N/A	4	4	N/A	N/A
Metanol Verde	6	N/A	5	5	5	5
Biometano derivado de residuos	1	N/A	2	2	3	3
Biometanol derivado de residuos	3	N/A	3	3	4	4
Biodiésel derivado de residuos	2	1	1	1	2	2
Baterías	N/A	N/A	N/A	N/A	1	1

El análisis multicriterio muestra que las baterías son la tecnología de propulsión con cero emisiones de carbono preferida para las aplicaciones que son factibles dada la baja densidad energética (las opciones no factibles están marcadas con N/A). Esto se debe a la alta eficiencia en el uso de energía renovable en baterías y motores. El análisis también muestra que todas las aplicaciones de las naves podrían adoptar el hidrógeno verde o el amoníaco, y algunas son adecuadas para ambos.

Como se detalla en la sección 1 de este informe, los biocombustibles, el metanol y los combustibles azules se eliminaron del resto del proyecto por otras razones, pero se muestran aquí para su comparación. Los biocombustibles y el metanol obtienen una buena puntuación en el análisis debido a la alta densidad del combustible y a su facilidad de manejo.

Apéndice B: Comparación de los peligros para la seguridad y el medio ambiente de los combustibles marinos seleccionados

	Diésel marino	Gas natural licuado	Metanol	Hidrógeno (líquido)	Amoníaco (líquido)
Peligros físicos					
Inflamabilidad	Cat. 3  H226 Líquido y vapores inflamables	Cat. 1  H220 Gas extremadamente inflamable	Cat. 2  H225 Líquido y gas altamente inflamable	Cat. 1  H220 Gas extremadamente inflamable	Cat. 2 H221 Gas inflamable
Gas bajo presión	No clasificado	 H281 Contiene gas refrigerado; puede causar quemaduras o lesiones criogénicas	No clasificado	 H281 Contiene gas refrigerado; puede causar quemaduras o lesiones criogénicas	 H280 Contiene gas a presión; puede explotar si se calienta
Peligros para la salud					
Toxicidad aguda	Cat. 4  H332 Nocivo por inhalación	No clasificado	Cat. 3  H301 H311 H331 Tóxico si se ingiere, contacto con la piel o inhalación	No clasificado	Cat. 3  H331 Tóxico si se inhala
Peligro de aspiración	Cat. 1  H304 Puede ser mortal si se ingiere y entra en las vías respiratorias	No clasificado	No clasificado	No clasificado	No clasificado
Corrosión de la piel	Cat. 2  H315 Provoca irritación de la piel	No clasificado	No clasificado	No clasificado	Cat 1/1B  H314 H318 Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves
Carcinogenicidad	Cat. 2  H350 Puede causar cáncer	No clasificado	No clasificado	No clasificado	No clasificado
Toxicidad específica en órganos diana	Cat. 2  H373 Puede provocar daños en los órganos por exposición prolongada o repetida	No clasificado	Cat. 1  H370 Provoca daños en los órganos (exposición única)	No clasificado	No clasificado
Peligros para el medio ambiente					
Peligros para el medio ambiente acuático	 Categoría 2 (crónica): Tóxico para la vida acuática con efecto prolongado (H411)	No clasificado	No clasificado	No clasificado	 Categoría 1 (aguda): Muy tóxico para la vida acuática con efectos duraderos (H400)
Resumen					
Resumen (US NFPA704)					

Fuente: Sailing on Solar [3]



Apéndice C: Definiciones de las categorías de naves

Categoría	Tamaño	Longitud (m)	Número de buques en todo el mundo	Capacidad	Tipos de buques IMO
Graneleros	Grandes	195+	5308	>60,000DWT	Graneleros (como granos, carbón, mineral, bobinas de acero y cemento), Graneles refrigerados y Carga general
	Pequeño	75-195	15410	<60,000DWT	
Petroleros	Grandes	195+	3571	>60,000DWT	Buque cisterna de gas licuado, Petrolero, Buque cisterna de otros líquidos y Buque cisterna de productos químicos
	Pequeño	75-195	9312	>60,000DWT	
Portacontenedores	Grandes	260+	1554	>5,000TEU	Buques portacontenedores: Pequeños buques alimentadores y fluviales hasta Panamax y buques portacontenedores ultra grandes.
	Pequeño	125-260	3604	<5,000TEU	
Buques de transporte de personas y vehículos	Grandes	120-360	1306	Varía según el tipo	Cruceiros, transbordadores: Roll-on-Roll-off (pasajeros), Roll-on-Roll-off (carga), Yates, Transbordadores de vehículos y de pasajeros
	Pequeño	30-205	5725	Varía según el tipo	
Altamar y servicios	—	30-290	14264	Varía según el tipo	Altamar (servicio y suministro de petróleo/gas y parques eólicos), Servicio, Remolcador, Bunker, Misceláneo
Pesca	—	5-145	8220	Varía según el tipo	Pesca: desde la costa hasta el océano

Fuente: Análisis de Ricardo y conversaciones con University College London [43]

Apéndice D: Demanda de electricidad para la propulsión de cero emisiones de carbono en 2030

Supuestos de entrada - Demanda

Descripción	Valor
Crecimiento de la demanda marítima 2018 - 2030	2%
Mejora de la eficiencia energética 2018 - 2030	1.2%
Adopción de combustibles con cero/bajas emisiones de carbono en 2030	5%
Tasa de cambio MEX/USD	19.77
Costes indexados a este año	2020

Datos de combustible/almacenamiento de Análisis Multicriterios (MCA)

Tipo de combustible	Tecnología del tren de potencia	Eficiencia del tren de potencia	Eficiencia del pozo al tanque	Horas de funcionamiento anual de la planta de producción	Notas
Batería	Motor eléctrico	90%	95%	8,760	
Biodiésel (derivado de residuos)	ICE - Compresión	50%	80%	7,446	
Biometano (derivado de residuos)	ICE - Chispa	40%	100%	7,446	
Biometanol (derivado de residuos)	ICE - Chispa	40%	77%	7,446	
Combustible fósil	ICE - Compresión	50%	N/A	8,000	
Amoníaco Verde	ICE - Compresión	50%	56%	8,000	
Hidrógeno Verde	ICE - Compresión	50%	56%	8,000	Incluida la licuefacción
Metanol Verde	ICE - Chispa	40%	43%	8,000	

Supuestos de entrada - Suministro de energías renovables

Tecnología	Contribución supuesta	Factor de capacidad	Coste instalado USDm/MW en 2030	
			caso bajo	caso alto
Energía solar fotovoltaica	23%	0.23	0.40	0.60
Energía solar concentrada	12%	0.39	1.89	2.84
Eólica terrestre	50%	0.3	0.93	1.40
Eólica marina	15%	0.45	1.53	2.30
Referencias			IRENA (2021) Tendencias globales de costos en 2018, según IRENA (2020) "Global Renewables Outlook" (p60)	

Requisitos energéticos calculados

Categoría de buque	Combustible/almacenamiento preferido de MCA	Tecnología del tren de potencia	Demanda de energía de los combustibles fósiles 2018	Demanda de energía de combustibles fósiles 2030	Demanda de energía de combustibles cero/bajos en carbono 2030, 100% de aceptación	Demanda de energía de combustibles cero/bajos en carbono en 2030, consumo supuesto del 1%.	Demanda de energía de combustibles con cero/bajas emisiones de carbono en 2030, 5% de absorción supuesta	Necesidad de electricidad renovable 2030, 100% de adopción supuesta	Necesidad de electricidad renovable en 2030, 1% de adopción supuesta	Necesidad de electricidad renovable en 2030, 5% de adopción supuesta
			GWh/año	GWh/año	GWh/año	GWh/año	GWh/año	GWh/año	GWh/año	GWh/año
Graneleros: Grandes	Amoníaco verde	ICE - Compresión	1,922	2,119	2,119	21	106	3,785	38	189
Graneleros: Pequeño	Hidrógeno verde	ICE - Compresión	3,643	4,017	4,017	40	201	7,173	72	359
Buques cisterna: Grandes	Amoníaco verde	ICE - Compresión	10,708	11,808	11,808	118	590	21,085	211	1,054
Cisternas: Pequeño	Amoníaco verde	ICE - Compresión	2,861	3,155	3,155	32	158	5,634	56	282
Portacontenedores: Grandes	Amoníaco verde	ICE - Compresión	5,370	5,922	5,922	59	296	10,575	106	529
Portacontenedores: Pequeño	Batería	Motor eléctrico	3,849	4,244	2,358	24	118	2,482	25	124
Personas y Veh. Carr: Grande	Amoníaco verde	ICE - Compresión	5,186	5,719	5,719	57	286	10,213	102	511
Personas y Vehículos Carr: Pequeño	Verde Hidrógeno	ICE - Compresión	2,303	2,540	2,540	25	127	4,536	45	227
Altamar y Servicios	Amoníaco verde	ICE - Compresión	987	1,088	1,088	11	54	1,944	19	97
Pesca	Amoníaco verde	ICE - Compresión	284	313	313	3	16	559	6	28
Embarcaciones pequeñas: Industrial	Batería	Motor eléctrico	1,460	1,610	894	9	45	942	9	47
Embarcaciones pequeñas: Pesca / Pequeña	Batería	Motor eléctrico	720	794	441	4	22	464	5	23
Gran total			39,292	43,330	40,375	404	2,019	69,391	694	3,470
Total - Batería					3,693	37	185	3,888	39	194
Total - Amoníaco Verde					30,125	301	1,506	53,794	538	2,690
Total - Hidrógeno Verde					6,557	66	328	11,709	117	585

Parámetros para el cálculo del potencial de inversión – Producción y entrega de combustible (Caso bajo en 2030)

Tipo de combustible	Necesidad anual de electricidad	Horas de funcionamiento de la planta de producción por año	Necesidad de capacidad eléctrica agregada	Coste de inversión en infraestructura de producción y suministro de combustible por MW de capacidad	Coste de inversión en infraestructura de producción y suministro de combustible	Coste de inversión en infraestructura de producción y suministro de combustible
	GWh/año	horas/año	MW	Capacidad de USDm/MW	USDm	MXNm
Batería	194	8760	22	0.15	3	66
Amoníaco Verde	2,690	8000	336	1.58	531	10,503
Hidrógeno Verde	585	8000	73	1.61	118	2,330
Total	3,470		432		652	12,899

Parámetros para el cálculo del potencial de inversión – Producción de combustible y entrega (Caso bajo en 2030)

Tipo de combustible	Requerimiento anual de electricidad	Capacidad instalada	Costo de inversión - plantas renovables	Costo de inversión - plantas renovables
	GWh/año	MW	USDm	MXNm
Solar FV	798	396	160	3,157
CSP	416	122	230	4,554
Eólica terrestre	1,735	660	614	12,138
Eólica marina	520	132	202	3,994
Total	3,470	1,310	1,206	23,843

Parámetros para el cálculo del potencial de inversión – Producción y entrega de combustible (Caso alto en 2030)

Tipo de combustible	Necesidad anual de electricidad	Horas de funcionamiento de la planta de producción por año	Necesidad de capacidad eléctrica agregada	Coste de inversión en infraestructura de producción y suministro de combustible por MW de capacidad	Coste de inversión en infraestructura de producción y suministro de combustible	Coste de inversión en infraestructura de producción y suministro de combustible
	GWh/año	horas/año	MW	Capacidad de USDm/MW	USDm	MXNm
Batería	194	8760	22	0.28	6	123
Amoníaco Verde	2,690	8000	336	2.10	706	13,960
Hidrógeno Verde	585	8000	73	2.07	151	2,995
Total	3,470		432		864	17,078

Parámetros para el cálculo del potencial de inversión – Producción de combustible y entrega (Caso alto en 2030)

Tipo de combustible	Requerimiento anual de electricidad	Capacidad instalada	Costo de inversión - plantas renovables	Costo de inversión - plantas renovables
	GWh/año	MW	USDm	MXNm
Solar FV	798	396	240	4,736
CSP	416	122	345	6,831
Eólica terrestre	1,735	660	921	18,207
Eólica marina	520	132	303	5,991
Total	3,470	1,310	1,809	35,765

Resumen del potencial de inversión

	Caso bajo	Caso alto
	MXNm	MXNm
Producción y suministro de combustible	12,899	17,078
Plantas renovables	23,843	35,765
Total	36,742	52,843

Apéndice E: Ciclo de vida de las emisiones de gases de efecto invernadero de los combustibles azules

Como se ha descrito en la sección 1, el hidrógeno azul es un término comúnmente aceptado para la producción de hidrógeno mediante el proceso de reformado de metano al vapor (SMR, por sus siglas en inglés) en el que se capturan algunas de las emisiones de dióxido de carbono y se evita que pasen a la atmósfera. El hidrógeno azul y su derivado, el amoníaco azul, podrían desempeñar un papel importante en la descarbonización del transporte marítimo. Tiene la ventaja de ser más barato de producir que el hidrógeno verde en la mayoría de las jurisdicciones, basándose en los costes actuales del gas natural (para el hidrógeno azul) y de las energías renovables (para el hidrógeno verde) [44].

Las emisiones de gases de efecto invernadero del hidrógeno azul durante su ciclo de vida son una consideración importante a la hora de evaluar su potencial como combustible marítimo de baja emisión de carbono. Las tecnologías actuales de captura de carbono no capturan el 100% del dióxido de carbono emitido por la planta SMR. Además, hay que tener en cuenta las emisiones de GEI en la cadena de suministro de gas natural, así como el proceso en el que se transporta y almacena el dióxido de carbono capturado. EDF y UMAS [45] han sugerido que las emisiones de GEI del ciclo de vida de los combustibles alternativos para el transporte deberían ser al menos un 50% menores que las emisiones del ciclo de vida de los combustibles convencionales. Por lo tanto, una reducción mínima del 50% en comparación con el diésel es un criterio útil para evaluar la aptitud de los combustibles azules como opciones de bajas emisiones de carbono para el sector del transporte marítimo.

El Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GHGP) es utilizado por algunos gobiernos (incluido el del Reino Unido) y empresas como norma independiente para informar sobre las emisiones de GEI. En este apéndice se utilizará para evaluar las emisiones de GEI del ciclo de vida del hidrógeno azul y el diésel. El GHGP divide las emisiones en 3 ámbitos distintos, donde cada ámbito considera un aspecto diferente de la cadena de suministro. A continuación, se han aplicado éstos para el análisis del hidrógeno azul y el diésel.

	Descripción	Diésel	Hidrógeno azul
Alcance 1	Emisiones directas en el punto de uso	Emisiones de GEI del motor del barco	Emisiones de GEI de la planta SMR No hay emisiones de GEI cuando el hidrógeno azul se utiliza para la propulsión del buque)
Alcance 2	Emisiones indirectas procedentes de la compra de electricidad o calor	No se aplica	Emisiones de GEI asociadas a la electricidad consumida por la planta SMR
Alcance 3	Emisiones de la cadena de valor, incluidas las materias primas	Emisiones de GEI en la cadena de suministro de diésel	Emisiones de GEI en la cadena de suministro de gas natural y en el proceso de transporte y almacenamiento del dióxido de carbono capturado

Las emisiones de Alcance 1 para el diésel se indican en los Factores de Conversión de GEI del Gobierno del Reino Unido para la presentación de informes de las empresas en 2020 [46] como 0.27 kg de CO₂ eq/kWh².

Las emisiones de alcance 1 para el hidrógeno azul se calculan en función de la cantidad de gas natural consumido por la planta SMR, que depende del diseño de la planta (es decir, de su eficiencia de conversión).

2 En este apéndice, a menos que se indique lo contrario, todas las unidades que hacen referencia al contenido energético del combustible se citan sobre la base del valor calorífico inferior (valor calorífico neto)

Un informe del IEAGHG [47] proporciona una útil visión general de los diferentes diseños de plantas y se utilizará como base para el análisis aquí. La eficiencia de conversión de la planta depende de la tecnología de captura de carbono, ya que generalmente se requiere más energía para aumentar la proporción de dióxido de carbono que se captura.

Actualmente hay un pequeño número de proyectos de captura de carbono en todo el mundo que han sido demostrados a escala industrial. La mayoría de ellos se han utilizado en el sector de la generación de energía fósil. En general, los proyectos han tenido dificultades para alcanzar los índices de captura previstos en la fase de diseño, con un ejemplo notable en Canadá que redujo su índice de captura objetivo al 65% después de unos años de funcionamiento, habiendo aspirado al 90% cuando se diseñó y construyó la planta [48]. Por lo tanto, los casos analizados para los SMR asumirán tasas de captura de alrededor del 60%, ya que esto es representativo del estado actual de la tecnología. Los casos de diseño 1A y 1B del informe del IEAGHG tienen unos índices de captura del 55.7% y 66.9% respectivamente, que se utilizarán como casos bajos y altos. Basándose en estos índices de captura, las emisiones de carbono se calcularon en 4.41 y 3.47 kg de CO₂ eq/kg de hidrógeno para los casos 1A y 1B respectivamente. Basándose en el contenido energético, equivalen a 0.13 y 0.10 kg de CO₂ eq/kWh de hidrógeno.

Las emisiones de alcance 2 no son aplicables a ninguno de los casos del IEAGHG porque las plantas exportarían electricidad en lugar de importarla.

Según el software de análisis del ciclo de vida SimaPro, la media mundial de emisiones de alcance 3 para el diésel es de 0.49 kg de CO₂ eq/kg, lo que equivale a 0.041 kg de CO₂ eq/kWh³.

Existe una amplia gama de estimaciones para las emisiones de alcance 3 del gas natural, lo que refleja una variedad de métodos de extracción y jurisdicciones (algunas con regulaciones estrictas respecto a las emisiones y otras con regulaciones más laxas). Balcombe et. al. [49] realizaron una amplia revisión de los factores de emisión de la cadena de suministro de gas natural publicados en diversas publicaciones de todo el mundo. Basándose en su revisión de las pruebas, propusieron un rango representativo de 0.0031 a 0.038 kg de CO₂ eq/MJ HHV10 sin licuefacción, que aumenta a 0.007 a 0.058 kg de CO₂ eq/MJ HHV si hay licuefacción. La conversión de estas cifras da un rango de emisiones de alcance 3 de 0.013 a 0.16 kg de CO₂ eq/kWh de gas natural (0.03 a 0.25 kg de CO₂ eq/kWh si el gas natural es licuado y regasificado).

Para el caso 1A, en el que la eficiencia térmica es del 73.5%, esto da como resultado un rango de alcance 3 para el hidrógeno de 0.017 a 0.21 kg de CO₂ eq/kWh; mientras que para el caso 1B, en el que la eficiencia térmica es del 69.7%, el rango de alcance 3 es de 0.018 a 0.22 kg de CO₂ eq/kWh de hidrógeno. Estos rangos suponen que el gas natural no está licuado; si lo está, las emisiones de alcance 3 aumentan en consecuencia.

La tabla siguiente resume estos resultados cuando el gas natural no se licua para el transporte y se regasifica para su uso.

Caso de bajas emisiones del hidrógeno azul (1B)	Diésel	Caso de bajas emisiones del hidrógeno azul (1B)	Caso de hidrógeno azul con altas emisiones (1A)
Alcance 1	0.27	0.10	0.13
Alcance 3	0.041	0.018	0.21
Total	0.31	0.12	0.34

³ Valor calorífico inferior del hidrógeno = 33.3 kWh/kg

La siguiente tabla resume los resultados equivalentes, pero para el caso en que el gas natural se licúa para el transporte y se regasifica para su uso.

kg CO ₂ eq/kWh hidrógeno	Diésel	Caso de hidrógeno azul de bajas emisiones (1B)	Caso de hidrógeno azul de altas emisiones (1A)
Alcance 1	0.27	0.10	0.13
Alcance 3	0.041	0.04	0.32
Total	0.31	0.14	0.45

Por lo tanto, según el análisis anterior, las emisiones del ciclo de vida del hidrógeno azul se sitúan entre el 39% y el 110% de las emisiones del ciclo de vida del diésel, dependiendo del diseño de la planta SMR y de la cadena de suministro de gas natural. Este porcentaje se eleva hasta el 45% y el 145% si la cadena de suministro de gas natural incluye la licuefacción y la regasificación, lo que es habitual si se importa.

Estos rangos superan en su mayoría el umbral de reducción de emisiones del 50% mencionado anteriormente. Además, hay que tener en cuenta que el análisis anterior no incluye las emisiones de GEI asociadas a la compresión, el transporte y el almacenamiento del dióxido de carbono capturado para garantizar que no se escape finalmente a la atmósfera.

Si la tecnología de captura se mejorara y se demostrara que alcanza tasas de captura del 90% a escala industrial, las emisiones de alcance 1 serían del orden de 0.03 kg de CO₂ eq/kWh (Caso 3 en [47]). Asumiendo la mediana de las emisiones de alcance 3 excluyendo la licuefacción de gas natural de [49] (0.015 kg CO₂ eq/MJ HHV), las emisiones totales del ciclo de vida para el caso de captura del 90% serían de 0.12 kg CO₂ eq/kWh de hidrógeno. Esto supone el 39% de las emisiones del ciclo de vida del diésel. Para el caso equivalente en el que se utiliza gas natural licuado con un índice de captura del 90%, las emisiones del ciclo de vida son de 0.17 kg de CO₂ eq/kWh de hidrógeno (55% comparado con el diésel). Se recalca que estas estimaciones excluyen las emisiones asociadas a la compresión, el transporte y el almacenamiento del dióxido de carbono capturado.

A modo de comparación en el contexto del Reino Unido, el Comité para el Cambio Climático del Reino Unido [44] proporciona un rango de 0.05 a 0.12 kg de CO₂ eq/kWh de hidrógeno asumiendo una tasa de captura del 95% y Sadler et al [45] calcula un valor medio de 0.13 kg de CO₂ eq/kWh basado en una tasa de captura del 90%.

Este análisis indica que, con las mejoras tecnológicas, es posible que el hidrógeno azul alcance el umbral de reducción de emisiones del 50% en el futuro, siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- i. Se hayan demostrado en la práctica, a escala industrial, unos índices de captura estables del orden del 90%;
- ii. Que existan reglamentos y controles eficaces para garantizar que las emisiones de la cadena de suministro de gas natural se encuentren dentro de límites aceptables; y
- iii. Las emisiones asociadas a la manipulación, el transporte y el almacenamiento del dióxido de carbono capturado se incluyan en la contabilidad.

El análisis multicriterio del Apéndice A refleja la realidad de que estas condiciones previas aún no se han cumplido.





Acerca de la Getting to Zero Coalition

La Getting to Zero Coalition es una plataforma de colaboración liderada por la industria que reúne a las principales partes interesadas de toda la cadena de valor del sector marítimo y de los combustibles con el sector financiero y otros comprometidos a hacer que las naves de emisiones cero comercialmente viables sean una realidad escalable para 2030.

Más información en:
www.globalmaritimeforum.org/getting-to-zero-coalition

2021 Todos los derechos reservados

