



Embarcaciones oceánicas

Evaluación tecnológica de control de emisiones

4 de febrero de 2026

- **Introducción a la evaluación tecnológica de embarcaciones oceánicas (OGV)**
- **Evaluación tecnológica: Evaluación de la tecnología de control de motores y emisiones**
- **Evaluación de sinergias de programas internacionales**
- **Evaluación de la disponibilidad de combustibles marítimos**
- **Puntos clave**
- **Próximos pasos**

- **Actualización de la evaluación tecnológica de CARB de 2018 sobre las características de emisiones de los motores OGV y las tecnologías y estrategias para reducir las emisiones de los OGV**
- **El objetivo es proporcionar una base de información actualizada para informar la consideración de la Regulación de Emisiones en Tránsito para los OGV**
- **Ampliar el alcance del estudio original para incluir:**
 - Evaluación de la evolución de la infraestructura de suministro de combustible y repostaje para Combustibles Marinos Bajos en Carbono (LCMF, por sus siglas en inglés)
 - Evaluación de posibles sinergias entre los objetivos de CARB y otros programas obligatorios y voluntarios de control de emisiones a nivel internacional

Elemento de estudio	Descripción de la tarea
Evaluación tecnológica	• Motores marinos de combustibles alternativos • Medidas de eficiencia • Sistemas de postratamiento
Evaluación de sinergias de programas internacionales	• Revisión comprensiva de los esfuerzos internacionales en marcha para reducir las emisiones de los OGV • Evaluación de oportunidades para adoptar o emular programas y regulaciones en California
Evaluación de la disponibilidad de combustibles marítimos	• Compilar estudios y pronósticos sobre la mezcla de combustibles marítimos • Evaluar la probable evolución de la disponibilidad de suministro de LCMF para los OGV

- **Evaluó una amplia gama de tecnologías y estrategias prometedoras para la reducción de emisiones, incluyendo:**
 - Motores de combustible alternativo
 - Gas Natural Licuado
 - Metanol
 - Amoníaco
 - Hidrógeno
 - Biocombustibles
 - Energía nuclear
 - Electricidad (baterías)
 - Captura, Utilización y Almacenamiento de Carbono (CCUS, por sus siglas en inglés)
 - Medidas de eficiencia
 - Sistemas de postratamiento

Evaluación tecnológica: Evaluación de la tecnología de control de motores y emisiones

- **La sección de evaluación tecnológica del informe incluía el siguiente análisis para cada tecnología y estrategia evaluada:**
 - Descripción de la tecnología
 - Necesidades de adecuación del sistema/red y de la infraestructura operativa
 - Posibles reducciones de emisiones
 - Disposición tecnológica
 - Economía
 - Próximos pasos para la demostración/despliegue
- **El material compartido en estas diapositivas se ha condensado por falta de tiempo y los detalles estarán contenidos en un informe próximo**

Motores de combustible alternativo

- **Descripción de la tecnología:** Utilizar GNL en motores de combustión interna (ICE, por sus siglas en inglés) para la propulsión. Los motores pueden ser sistemas de combustible de único o dual, y de dos tiempos (baja velocidad) y cuatro tiempos (media velocidad). Los motores de combustible dual pueden operar con GNL o combustibles marinos convencionales (por ejemplo, HFO, MGO) con flexibilidad basada en la disponibilidad y el precio del combustible. Se requiere combustible piloto diésel para el encendido.
- **Disposición tecnológica:** Comercialmente madura y desplegada globalmente, apoyada por una red de repostaje en expansión en los principales puertos. Más de 600 barcos alimentados con GNL y 700 transportadores de GNL actualmente en servicio y 800+ en pedido a nivel mundial.¹ Motores probados de doble combustible de 2 y 4 tiempos de fabricantes de motores como WinGD, Everlence (MAN) y Wärtsilä
- **Reducciones de emisiones:** Elimina el óxido de azufre (SO_x) y reduce el material particulado (PM, por sus siglas en inglés) hasta un 90%. Reducciones en óxidos de nitrógeno (NO_x) (~85–95%) bajo condiciones favorables de motor/funcionamiento, pero los motores de alta presión suelen requerir que el SCR/EGR cumpla con las normativas Nivel III de la Organización Marítima Internacional (OMI). Hasta un 25% menos de CO_2 en base tanque-estela debido a una mayor proporción hidrógeno-carbono; sin embargo, el deslizamiento de metano (CH_4 no quemado) debe controlarse. Las reducciones de gases de efecto invernadero (GEI) durante el ciclo de vida varían desde menores (GNL fósil) hasta significativas (bio-GNL, GNL sintético).
- **Beneficios/Retos:** La mayoría de los combustibles marinos alternativos comercialmente maduros se benefician de décadas de experiencia en portadores de GNL. Los sistemas de combustible criogénico añaden complejidad/costo y requieren espacio y aislamiento adicionales, lo que podría afectar a la capacidad de carga, pero están bien establecidos en el uso comercial hoy en día. El control del deslizamiento de metano es esencial para los beneficios de los GEI.

- **Descripción de la tecnología:** Alcohol simple que puede producirse a partir de una variedad de materias primas. Utilizado ICE de combustible dual y único, incluyendo configuraciones diésel de dos tiempos y ciclos Otto de cuatro tiempos con combustión pobre. Se espera que los motores de combustible dual dominen a corto y medio plazo. Requiere inyección piloto de diésel para el encendido. También puede usarse en pilas de combustible que convierten metanol químicamente en electricidad, pero la madurez es baja.
- **Disposición tecnológica:** Alta con motores de combustible dual comercialmente disponibles, incluyendo dos tiempos (Everllence B&W ME-LGIM, WinGD X-DF-M) y cuatro tiempos (Wärtsilä, Everllence, HD Hyundai Heavy Industries). Fiabilidad probada a escala piloto y de flota temprana. A finales de 2024, 34 barcos funcionaban con metanol y otros ~240 en pedido¹. Se espera madurez total en el mercado ~2030.
- **Reducciones de emisiones:** Elimina el SO_x y reduce el PM en un 95%. Reducciones en NO_x del 30% al 83% dependiendo de la combustión y la estrategia posterior al tratamiento. Entre los combustibles basados en combustión de GEI con menor impacto con reducciones de pozo a estela del 25-40% (materia prima de gas natural fósil) al 70-90% (materia prima renovable), lo que podría ser un negativo neto si se utilizan corrientes de residuos biometanos.
- **Beneficios/Retos:** Puede usar diseños convencionales de tanques similares a sistemas de fuelóleo. La menor densidad energética significa que los barcos deben transportar volúmenes de combustible 2–3 veces mayores para alcanzar un alcance equivalente. Tóxico e inflamable, lo que requiere sistemas especializados de manipulación, ventilación y detección. Se necesitarán ampliaciones significativas tanto en la disponibilidad de combustible como en la infraestructura de repostaje.

- Descripción de la tecnología: Combustible a base de hidrógeno compuesto por nitrógeno e hidrógeno (NH_3) combustionado en ICE. Se están desarrollando motores de amoníaco tanto en configuraciones de dos tiempos como de cuatro tiempos para propulsión principal y aplicaciones auxiliares. Los motores actuales son de combustible dual y requieren combustible piloto diésel.
- Disposición tecnológica: Media/Alta. El desarrollo de motores por J-ENG, Everllence, Wärtsilä y WinGD está en marcha, con demostraciones comerciales comenzando ahora. A finales de 2024, 3 barcos funcionan con amoníaco y otros ~26 en pedido¹.
- Reducciones de emisiones: Reducciones significativas en las emisiones de SO_x , CO y PM, pero se necesita un tratamiento posterior para gestionar el NO_x . El deslizamiento (NH_3 no quemado) debe minimizarse tanto como contaminante como precursor del $\text{PM}_{2.5}$ secundario. El combustible sin carbono elimina el CO_2 en los gases de escape. La formación de N_2O es preocupante, pero parece controlable. Los impactos de los GEI de pozo a estela incluyen aumentos (fósil, sin CCUS) hasta reducciones que van del 0-60% (fósil con CCUS) al 60-90% (renovables).
- Beneficios/Retos: Altamente tóxico y corrosivo, requiriendo materiales especializados, sistemas de ventilación y detección para mitigar riesgos para la salud y el medio ambiente. Se beneficia de una red global existente para fertilizantes, pero serán necesarias expansiones significativas tanto de la disponibilidad de combustible como de la infraestructura de repostaje.

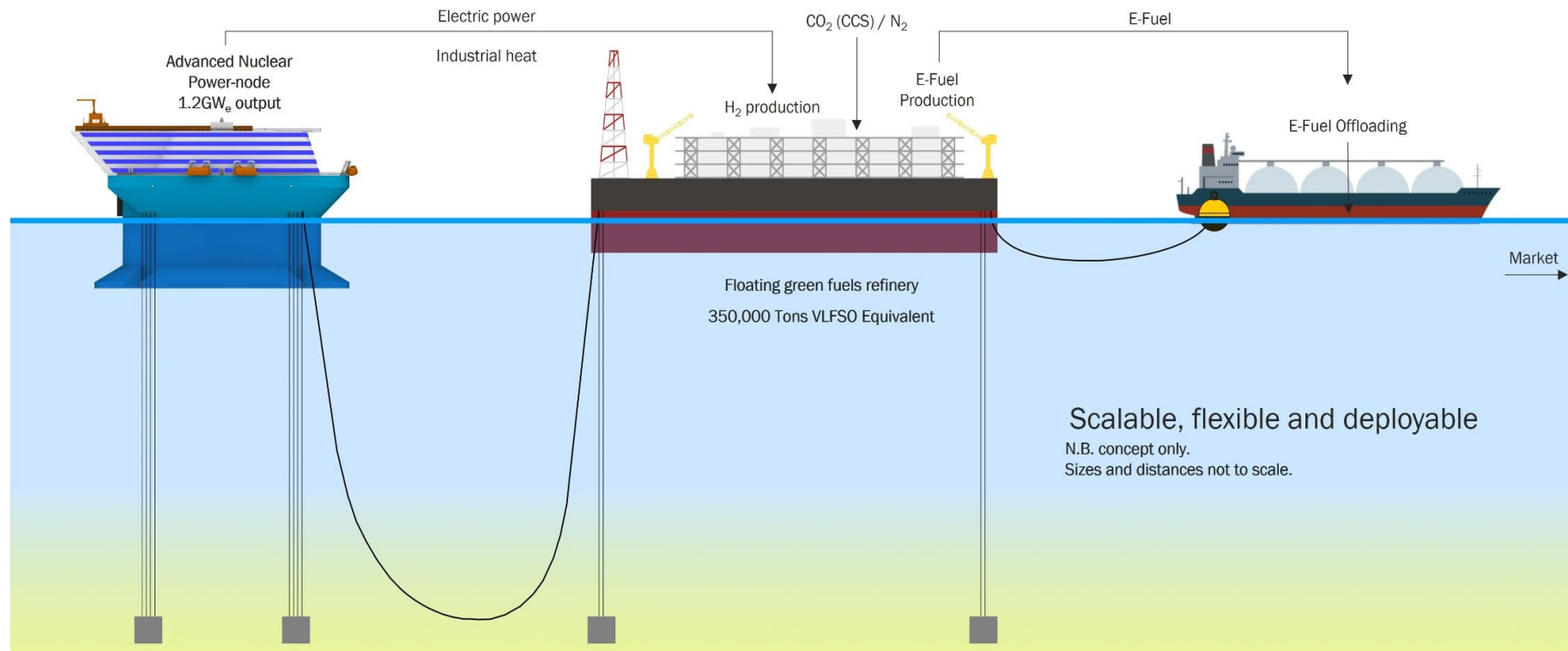
- **Descripción de la tecnología:** Combustibles líquidos de base biológica derivados de fuentes renovables, incluyendo diésel renovable (HVO) y biodiésel (FAME), que se combustan en motores diésel de encendido por compresión. El HVO se produce mediante procesos de hidrotratamiento similares al refinado de petróleo. La FAME se produce mediante la transesterificación de aceites, grasas animales o desechos aceites de cocina y contiene O_2 en su estructura molecular, lo que resulta en propiedades de combustión ligeramente diferentes.
- **Disposición tecnológica:** Comercial. El diésel renovable es un verdadero combustible directo y el biodiésel es semidirecto y puede requerir modificaciones menores en el motor. Wärtsilä y Everllence confirman compatibilidad entre las principales plataformas de motores de 2 y 4 tiempos.
- **Reducciones de emisiones:** Elimina el SO_x y reduce el PM del 38% al 90%. Los impactos sobre los NO_x son matizados según el tipo de combustible, el tipo de motor, la carga, etc. En general, los estudios han mostrado NO_x similares o ligeramente menores para HVO. Las mezclas FAME pueden causar ligeros aumentos de NO_x ($\approx 3-7\%$) dependiendo de las condiciones de mezcla y carga. Los GEI durante el ciclo de vida dependen de la materia prima, el diésel renovable puede reducir hasta el 65–80% y el biodiésel el 50-70% dependiendo del nivel de mezcla (p.ej., B20–B100). El HVO de los aceites residuales e hidrógeno verde produce un GEI neto cercano a cero.
- **Beneficios/Retos:** La compatibilidad con motores existentes, el repostaje, etc., es una gran ventaja. Las limitaciones de materias primas y la competencia con otros sectores pueden limitar el papel de los biocombustibles en el transporte marítimo a una contribución transicional.

- **Descripción de la tecnología:** Los reactores nucleares se utilizan para generar calor y producir vapor, que a su vez impulsa turbinas para la propulsión de los barcos y la generación de energía eléctrica a bordo. Los reactores modulares pequeños (SMR, por sus siglas en inglés) están avanzando y podrían "desbloquear" aplicaciones nucleares marinas debido a menores costos en capital, un despliegue más rápido, mayor flexibilidad en la ubicación, mayor escalabilidad y seguridad mejorada.
- **Disposición tecnológica:** Historial probado en embarcaciones militares, pero limitadas aplicaciones civiles. Los SMR están progresando, pero no se ha conseguido la certificación marítima comercial. Los principales accionistas están realizando estudios regulatorios/de viabilidad para los barcos reactores de próxima generación¹, con los primeros pilotos comerciales posiblemente en la década de 2030.
- **Reducciones de emisiones:** La ausencia de combustión elimina todas las emisiones contaminantes del tanque a estela. Entre las menores emisiones de GEI de cualquier opción marina, con cero impactos directos y muy bajos en el ciclo de vida en comparación con los combustibles convencionales y alternativos. Beneficios significativos en calidad del aire y GEI en todas las etapas de la operación de la embarcación.
- **Beneficios/Retos:** Tamaño compacto, alta densidad energética y capacidad para operar potencialmente durante años sin repostar. Altos costos iniciales de capital, aunque los costos operativos son bajos. La falta de marcos regulatorios existentes (p.ej., un código dedicado a embarcaciones nucleares de la OMI) y la percepción pública negativa son desafíos.

1: Lloyd's Register, 2024 "LR y CORE POWER realizarán un estudio regulatorio de próxima generación sobre buques portacontenedores nucleares"

UCI Centrales nucleares flotantes (FNPP)

- Los SMR instalados en barcasas flotantes pueden proporcionar energía o combustibles de cero emisiones a barcos/puertos y servir como peldaño hacia las embarcaciones mercantes propulsadas por energía nuclear
 - La *Akademik Lomonosov* rusa es la primera FNPP del mundo con dos SMR capaces juntas de producir 70 megavatios de electricidad y 50 gigacalorías por hora de energía térmica



Fuente: CORE POWER

UCI Embarcaciones alimentadas por hidrógeno

- **Descripción de la tecnología:** El hidrógeno puede ser combustionado directamente en un motor de combustión interna (H_2 -ICE) o utilizado en pilas de combustible (FC, por sus siglas en inglés) que convierten hidrógeno electroquímicamente en electricidad para propulsión o energía auxiliar. Los sistemas FC tienen altas eficiencias y producen emisiones insignificantes. Los H_2 -ICE son motores alternativos modificados que pueden ser encendidos por chispa, sistemas de combustible dual (hidrógeno-diésel) e inyección directa.
- **Disposición tecnológica:** Media/baja. Los H_2 -ICE están en demostraciones tempranas para embarcaciones más pequeñas. Las FC requieren avances en densidad de potencia, costo y durabilidad, y los estudios indican que las pilas de combustible son más viables para roles auxiliares o híbridos a corto y medio plazo para los OGV.
- **Reducción de emisiones:** Los sistemas FC producen únicamente agua y logran grandes reducciones en las emisiones de contaminantes y GEI. Los H_2 -ICE reducen el SO_x , PM, CO y HC y eliminan CO_2 , pero el NO_x sigue siendo el principal desafío técnico. Las reducciones de GEI por hidrógeno verde y azul varían entre el 50 y el 100 %, dependiendo del método de producción.
- **Beneficios/Retos:** La baja densidad energética genera restricciones de volumen de almacenamiento. Las redes de repostaje de hidrógeno son prácticamente inexistentes y se necesita la amplia disponibilidad de hidrógeno verde, infraestructuras seguras de repostaje y almacenamiento, así como un mayor avance en regulación y estandarización.

UCI Embarcaciones alimentadas por electricidad

- **Descripción de la tecnología:** Las baterías pueden usarse tanto para embarcaciones totalmente eléctricas como para sistemas de propulsión híbridos. Para los OGV, las baterías se consideran principalmente como sistemas híbridos para reducción de picos, operación en zonas portuarias sin emisiones y cargas hoteleras a corto plazo. El planchado en frío consiste en apagar los generadores diésel a bordo de una embarcación mientras está en el atraque y suministrar toda la energía necesaria desde tierra, eliminando las emisiones en puerto y reduciendo el ruido y el consumo de combustible.
- **Disposición tecnológica:** Media para aplicaciones híbridas/área portuaria/hotelera (5-20 MW) y muy baja para propulsión (80+ MW). El planchado en frío está comercialmente avanzado y se utiliza en los principales puertos del mundo.
- **Reducción de emisiones:** Las tecnologías eléctricas de baterías no tienen emisiones directas, aunque los impactos de los GEI durante el ciclo de vida estarán determinados por las vías eléctricas. El planchado en frío reduce significativamente las emisiones de contaminantes y CO₂ de los motores auxiliares diésel.
- **Beneficios/Retos:** Opción verdadera de cero emisiones, pero baja densidad energética de baterías requiere grandes cantidades para la propulsión; p.ej., incluso proyecciones optimistas de densidad energética de baterías marinas implican que se necesitarían miles o decenas de miles de toneladas de baterías con costos muy altos, un desplazamiento significativo de carga y un rediseño de la embarcación. Además, serían necesarias grandes construcciones de infraestructuras para proporcionar la carga necesaria.

Captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS)

- **Descripción de la tecnología:** Sistemas diseñados para separar y capturar CO₂ de motores marinos o de los gases de escape de combustible, evitar su liberación a la atmósfera y ya sea almacenarlo de forma segura o reutilizarlo en productos útiles.
- **Disposición tecnológica:** Probado en aplicaciones terrestres, pero no probado en aplicaciones marinas. Los estudios muestran que los sistemas CCUS pueden aplicarse potencialmente de forma segura en los barcos, pero es necesario un mayor desarrollo y optimización marina para una adopción extensa.
- **Reducciones de emisiones:** Los CCUS pueden reducir el CO₂ directo entre un 20 y un 70%, dependiendo de la eficiencia del sistema y el tipo de embarcación. No elimina inherentemente otros contaminantes como NO_x, SO_x o PM a menos que se combine con otros sistemas.
- **Beneficios/Retos:** Los sistemas CCUS podrían ser una vía adaptada para reducir los GEI de los OGV existentes, especialmente cuando la conversión a combustibles alternativos resulta prohibitiva en cuanto al costo. Aunque técnicamente factible y compatible con los sistemas actuales de motores, la adopción extensa depende de superar desafíos en eficiencia energética, logística de almacenamiento de CO₂ y armonización regulatoria.

Medidas de eficiencia

- **Descripción de la tecnología:** Incluye un conjunto de estrategias operativas y técnicas que reducen la demanda energética total de un viaje.
- **Disposición de la tecnología:** Varía según la medida, desde totalmente maduro comercialmente hasta prototipo.
 - **Las opciones comercialmente maduras y de bajo costo ofrecen rendimientos inmediatos con tiempos de recuperación cortos como:**
 - Enrutamiento optimizado
 - Reducción de potencia del motor, recubrimientos
 - Generadores de eje
 - Mejoras en la iluminación
 - **Las medidas a largo plazo tienen mayores costos de capital y requisitos de integración, pero un mayor potencial de reducción de emisiones, especialmente cuando se combinan con combustibles alternativos. Estas tecnologías incluyen:**
 - Lubricación de aire
 - Asistencia de viento
 - Sistemas de recuperación de calor residual

- **Reducciones de emisiones:** Las reducciones de emisiones se producen por la reducción del consumo de combustible, lo que tiene el beneficio de reducir todas las especies contaminantes y de GEI. Las reducciones individuales varían entre ~1% y 20%. Cuando se aplican juntas, las medidas pueden reducir colectivamente el consumo total de combustible y las emisiones entre un 20 y un 50%, dependiendo del tipo de embarcación, el perfil operativo y la edad. Sin embargo, apilar muchas de las medidas tiene rendimientos decrecientes, p.ej., optimización de velocidad + enrutamiento climático + optimización de propulsión no es perfectamente aditivo.
- **Beneficios/Retos:** Puede ser una solución a corto plazo, de bajo riesgo y rentable para reducir las emisiones, compatible con otros combustibles alternativos, aunque algunas medidas tienen un alto costo inicial. La idoneidad para algunas medidas se determina por los perfiles de las embarcaciones y no todas las medidas son adecuadas para todos los tipos de embarcaciones; p.ej., la optimización del trimado, la lubricación de aire y los recubrimientos del casco dependen del estado del casco, el ensuciamiento y los perfiles operativos.

Sistemas de postratamiento

- Los sistemas de postratamiento son dispositivos instalados posterior al escape del motor para capturar o convertir químicamente contaminantes en compuestos menos dañinos.

Tecnología	Contaminantes objetivo	Reducción típica (%)
Reducción catalítica selectiva (SCR, por sus siglas en inglés)	NO _x	NO _x : 85-95%, Diseñado para cumplir con los estándares Nivel III
Recirculación de gases del escape (EGR, por sus siglas en inglés)	Deslizamiento de NO _x y Metano (CH ₄)	NO _x : 10-80% CH ₄ : 30-50% En modo gaseoso de ciclo otto
Depuradores	SO _x , PM, algunos NO _x	SO _x : >90% PM: 20-50% NO _x : 0-10%
Filtro de partículas de diésel*	PM	PM: >90%
Catalizador de oxidación de diésel*	CO, Hidrocarburos, PM	CO/HC: 50-90% PM: 20-40%
Precipitadores electrostáticos húmedos (WESP, por sus siglas en inglés)*	PM	PM: 60-95% (depurador + WESP)

*Tecnologías emergentes, no bien establecidas para los OGV

UCI Sistemas de postratamiento

- Los sistemas de postratamiento son dispositivos instalados posterior al escape del motor para capturar o convertir químicamente contaminantes en compuestos menos dañinos.

Tecnología	Madurez comercial de OGV	Perspectivas de OGV
Reducción catalítica selectiva (SCR)	Comercial, ampliamente adoptado para motores de 2 y 4 tiempos tanto para aplicaciones principales como auxiliares. Puede ser utilizado por motores de combustible único y dual.	Actualmente favorece la tecnología de cumplimiento NOx Nivel III tanto para principal como auxiliar. Puede usarse con combustibles alternativos.
Recirculación de gases del escape (EGR)	Comercial, en su mayoría motores principales de dos tiempos. Mayormente usado para motores principales, pero puede usarse en generadores auxiliares. Puede usarse para motores de combustible único y dual.	Motores de dos tiempos de Nivel III dificultados por la logística de urea, motores de GNL (deslizamiento de metano).
Depuradores	Totalmente comercial y ampliamente adoptado para motores de 4 tiempos y de 2 tiempos de construcción nueva. Centrado en motores principales, pero puede ser utilizado por motores auxiliares. Retroajuste moderado de motores de dos tiempos. La gestión del agua de lavado puede ser un problema.	Estándar industrial para el cumplimiento de las regulaciones de azufre de la OMI.
Filtro de partículas de diésel	Comercial para generadores auxiliares de 4 tiempos que utilizan combustibles destilados (bajo en azufre). Regeneración necesaria de vez en cuando.	Potencialmente adecuado para algunos motores de 4 tiempos. Probablemente no sea adecuado para 2 tiempos.
Catalizador de oxidación de diésel	Comercial para generadores auxiliares de 4 tiempos que utilizan combustibles destilados (bajo en azufre).	Potencialmente adecuado para algunos motores de 4 tiempos. Probablemente no sea adecuado para 2 tiempos.
Precipitadores electrostáticos húmedos (WESP)	Los WESP marinos están en desarrollo o en los primeros años comerciales. Varias empresas ahora comercializan WESP específicos para el sector marítimo.	Motores de 2 tiempos de baja velocidad. Generadores auxiliares de 4 tiempos.



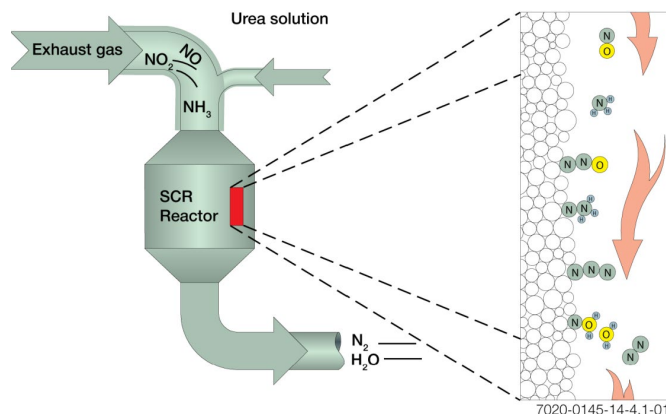
*Tecnologías emergentes, no bien establecidas para los OGV

• Actualmente disponible para OGVs

- SCR: Utilizado para cumplir con las normas de emisiones de NO_x Nivel III de la OMI tanto para motores actuales como de combustible alternativo.
- EGR: Comercial, se usa principalmente para motores de dos tiempos. Puede usarse para motores de combustible único y dual.
- Depuradores: Totalmente comercial y ampliamente adoptado para motores de 4 tiempos y de 2 tiempos de construcción nueva. Modernización moderada de motores de dos tiempos.

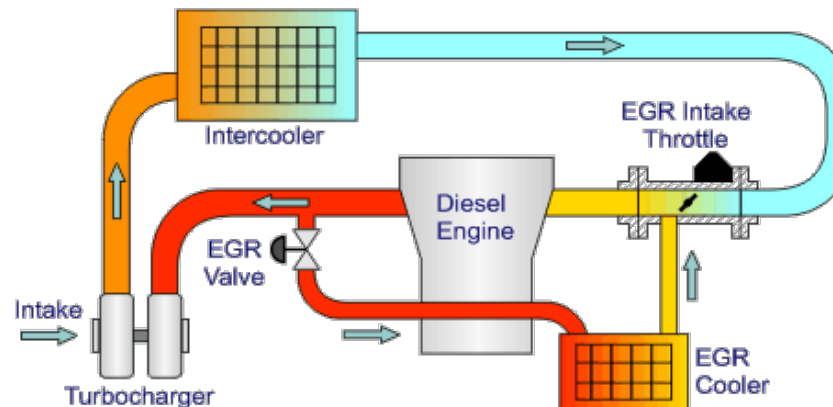
• Otras opciones aún están surgiendo y podrían evolucionar para desempeñar un papel en el futuro

Principios de SCR (NO_x)



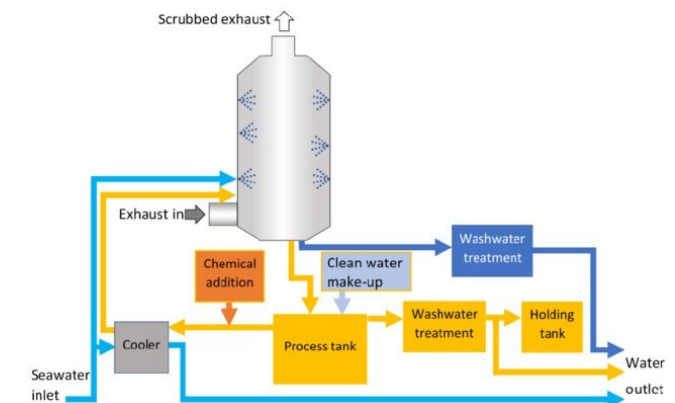
Fuente: Everllence, 2020

Principios de EGR (NO_x & CH_4)



Fuente: Dieselnet.com

Principios de Depuradores (PM, SO_x)



Fuente: Reportes Científicos de ICES, 2020

Evaluación tecnológica: Puntos clave

- **La transición hacia combustibles alternativos en el transporte marítimo ya está en marcha**
 - El cambio hacia tecnologías marinas de bajas y cero emisiones está avanzando, con GNL, biocombustibles y metanol ya en servicio y motores de amoníaco esperados comercialmente para ~2030.
- **No existe una “formula mágica” y es casi seguro que el sector incluirá una gama de combustibles y tecnologías alternativas en el futuro**
 - Un enfoque de portafolio que adapte la tecnología al tipo de buque, la ruta y el contexto regulatorio generará los mayores beneficios en las emisiones, especialmente a corto y medio plazo.
- **Los motores de combustible dual desempeñarán un papel esencial en la adopción de combustibles alternativos a corto y medio plazo**
 - Los sistemas de combustible dual permiten a las embarcaciones ajustar las proporciones de combustible en función de la disponibilidad y el rendimiento de las emisiones, asegurando flexibilidad durante la construcción inicial de la infraestructura
- **Las demostraciones y la alineación de políticas son pasos necesarios en la transición**
 - La viabilidad comercial no depende solo de la viabilidad tecnológica, sino de marcos regulatorios coordinados, incentivos financieros y preparación de infraestructuras, colaboración con la industria e implicación/formación de la tripulación.

UCI Posible cronología de la disposición tecnológica

- Los plazos de adopción probablemente dependerán de la convergencia de factores tecnológicos, económicos, regulatorios, de infraestructura y de la cadena de suministro

Corto plazo

Medio plazo

Largo plazo

Las medidas de eficiencia, el GNL y los sistemas de tratamiento de gases de escape ofrecen vías inmediatas para reducir las emisiones de contaminantes. Los biocombustibles pueden reducir las emisiones de GEI. La energía desde tierra (planchado en frío) puede abordar las preocupaciones locales sobre la calidad del aire.

El metanol y el amoníaco pueden reducir significativamente las emisiones de contaminantes y gases de efecto invernadero. Ambos requerirán control de NOx y el amoníaco requerirá control del deslizamiento del amoníaco. Los sistemas de pilas de combustible y baterías pueden proporcionar reducciones respecto a los motores auxiliares.

Los sistemas de pilas de combustible y baterías eléctricas en roles de propulsión/híbridos y OGV alimentados por energía nuclear tienen el mayor potencial de reducción de emisiones contaminantes y de GEI. Los sistemas CCUS pueden reducir las emisiones directas de GEI.

- **Los combustibles alternativos disponibles ahora y a medio plazo pueden proporcionar grandes reducciones en las emisiones de contaminantes y GEI, y mejorar la calidad del aire cerca de las poblaciones costeras**
 - El GNL, metanol, amoníaco, biocombustibles e hidrógeno eliminan los SO_x y reducen significativamente las emisiones de PM y otros contaminantes, p.ej., metales pesados, hidrocarburos sin quemar, etc.
 - **Sin embargo, el control de NO_x es esencial y requerirá estrategias de tratamiento posterior para la mayoría de los combustibles alternativos que aún dependen de la combustión**
 - Otros subproductos no deseados (p.ej., metano y amoníaco que se deslice) deben minimizarse
- **Sin embargo, los sistemas maduros y rentables de postratamiento seguirán siendo vitales hasta que las opciones de propulsión y motores auxiliares de cero emisiones o cercanos estén listos comercialmente**
 - Proporcionar importantes reducciones a corto plazo respecto a los combustibles convencionales y será necesario para lograr todos los beneficios de algunos combustibles alternativos, incluido el amoníaco
- **Las tecnologías emergentes muestran un potencial a largo plazo para un sector marítimo de cero y casi cero emisiones**
 - La propulsión nuclear, las pilas de combustible y las tecnologías de baterías eléctricas podrían lograr finalmente cero emisiones de contaminantes y de GEI, pero ambas enfrentan costos, seguridad y obstáculos regulatorios significativos
 - Los sistemas CCUS podrían ser una vía adaptada para reducir los GEI de los OGV existentes, especialmente cuando el costo de la conversión a combustibles alternativos es prohibitivo, pero requiere avances en madurez tecnológica para aplicaciones marinas

- **Los enfoques de reducción de emisiones por estratificación representan el enfoque óptimo**
 - Uso de medidas operativas y de eficiencia para reducir la demanda total de combustible
 - Transiciones a combustibles alternativos para una combustión más limpia a corto y medio plazo
 - Despliegue conjunto con sistemas de postratamiento para controlar NO_x, PM, amoníaco y deslizamiento de metano, etc.
 - Transiciones a tecnologías de cero y casi cero emisiones cuando sea factible
- **El requisito de combustibles piloto para motores de combustible dual puede anular algunos de los beneficios de emisiones contaminantes de combustibles alternativos**
 - El uso de combustible piloto cerca de la costa podría conllevar preocupaciones locales sobre la calidad del aire, p.ej., si la ignición del motor ocurre en el atraque o transitando dentro y fuera del puerto
 - El uso de biocombustibles bajos en carbono puede prevenir la degradación en beneficios de los GEI

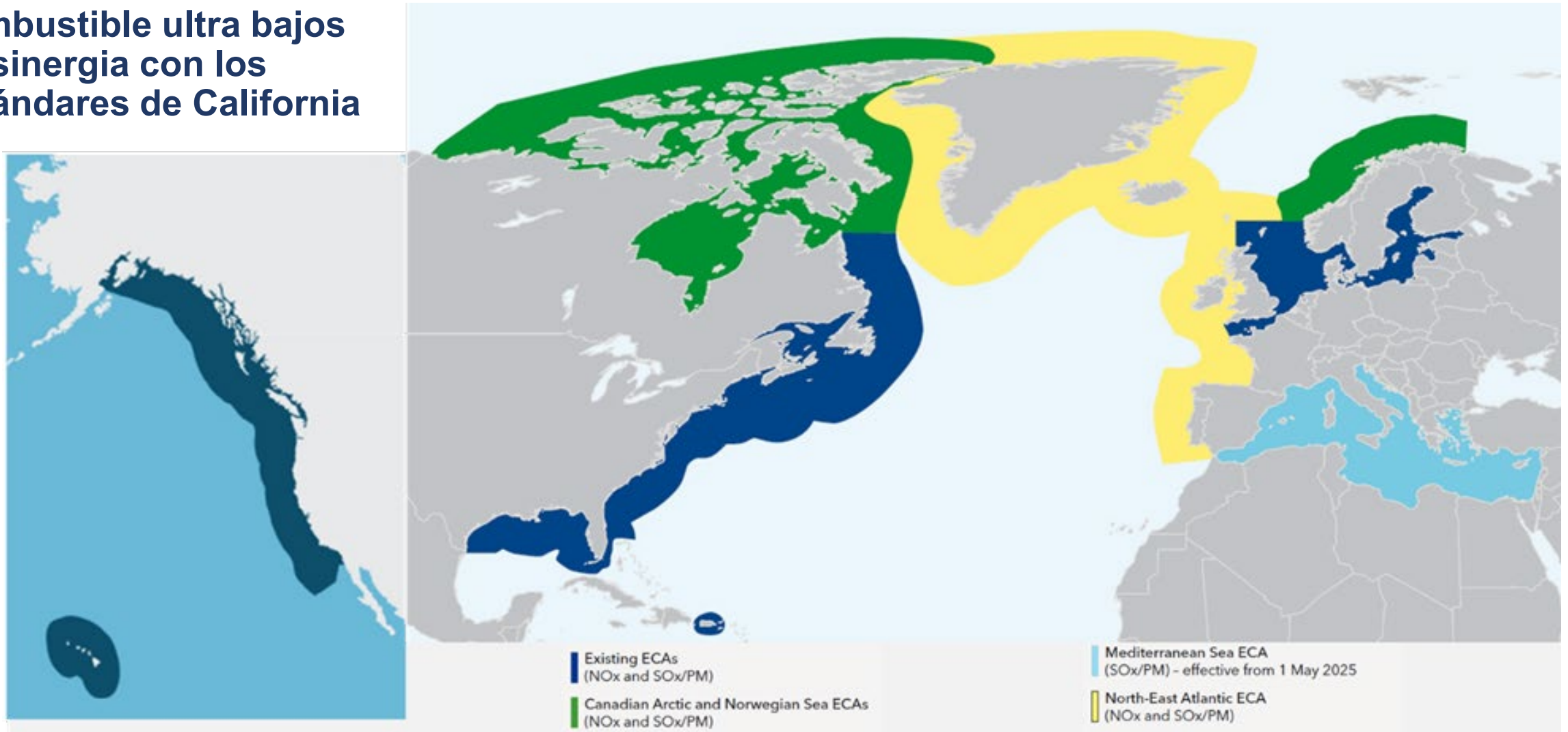
Evaluación de sinergias de programas internacionales

- Hay muchos programas en marcha internacionalmente para abordar las emisiones del sector marítimo – más de 50 programas revisados
- Existen varias capas:
 - Programas y regulaciones multinacionales, en particular la Organización Marítima Internacional
 - Programas y regulaciones a nivel nacional
 - Programas y regulaciones estatales y locales, incluyendo iniciativas portuarias
 - Programas no gubernamentales como Corredores de Envío Verde y colaboraciones industriales (constructores navales, clientes navieros, proveedores de equipos)
- En comparación con los OGV, hay un enfoque importante en el carbono, aunque también hay cierto énfasis en las emisiones no relacionadas con carbono cercanas a la costa
- Los LCMF son muy bajos en azufre y la mayoría tienen baja propensión a producir PM, pero todos requerirán mitigación de NOx para cumplir con los estándares de California si son combustionados cerca de la costa
- Las Áreas de Control de Emisiones (ECA, por sus siglas en inglés) ofrecen la mejor oportunidad para establecer estándares internacionales de NOx (establecidas bajo tratado)

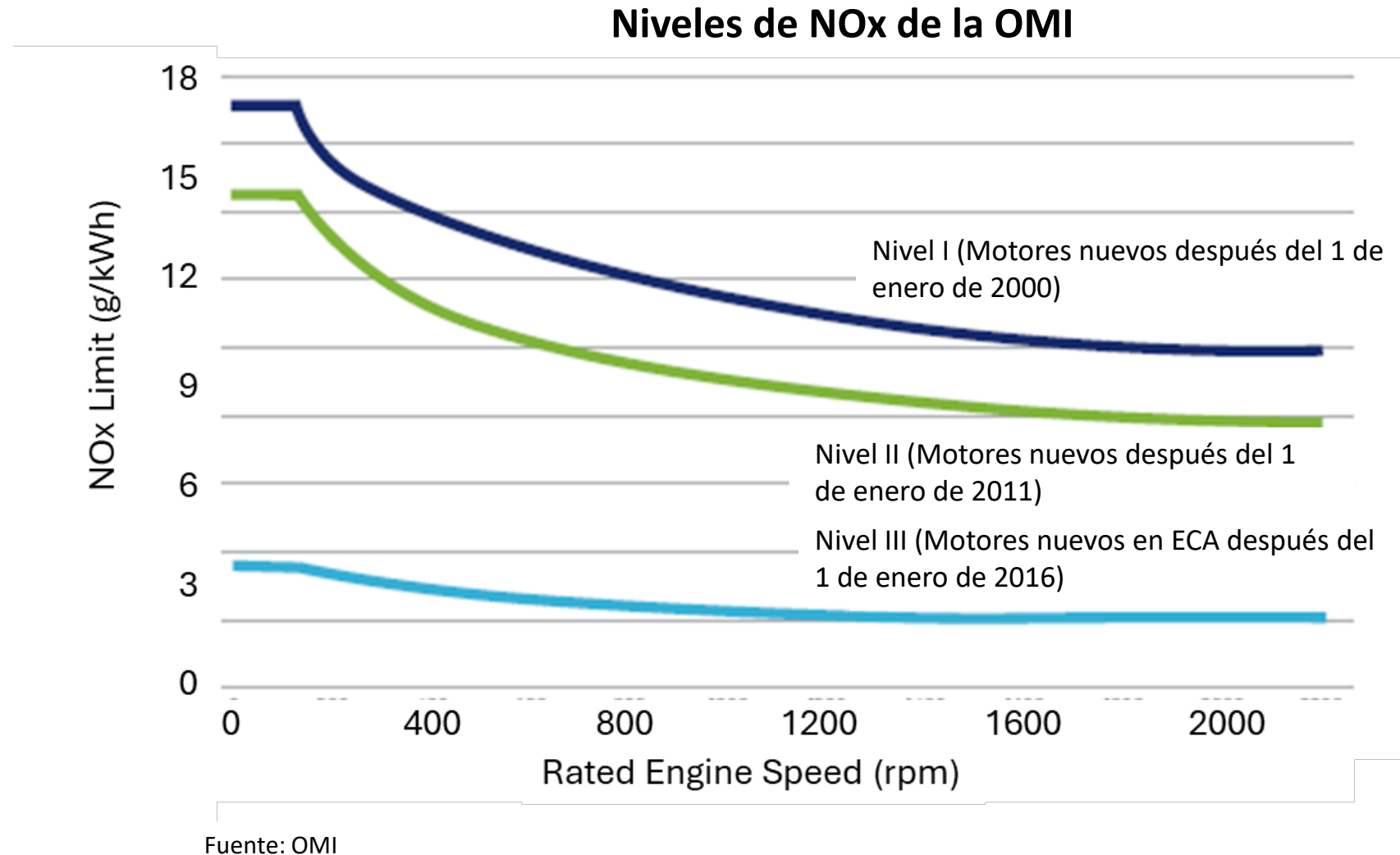
- **Política y regulación avanzada a través del Comité de Protección Ambiental Marítima (MEPC, por sus siglas en inglés)**
- **La OMI ha adoptado varias normativas que afectan a las emisiones:**
 - El Índice de Diseño de Eficiencia Energética (EEDI, por sus siglas en inglés)
 - Índice de Eficiencia Energética de Embarcaciones Existentes (EEXI, por sus siglas en inglés)
 - Indicador de Intensidad de Carbono (CII, por sus siglas en inglés)
 - Planes de Gestión de Eficiencia Energética de las Embarcaciones (SEEMP, por sus siglas en inglés)
- **Las políticas y regulaciones de la IMO / MEPC se vuelven vinculantes cuando se incorporan a las regulaciones de la MARPOL**
- **MARPOL (abreviatura de Contaminación Marítima) es un tratado internacional que establece la autoridad legal para la regulación vinculante de las emisiones marítimas**
- **MARPOL regula NOx y SOx mediante la creación de ECAs, de las cuales actualmente hay 7 (siguiente diapositiva)**
- **La Regulación de Gases de Efecto Invernadero ha sido un área de creciente atención: la estrategia de GEI de la OMI fue adoptada en 2023 y se está implementando en etapas**

Límites de azufre de combustible ultra bajos en sinergia con los estándares de California

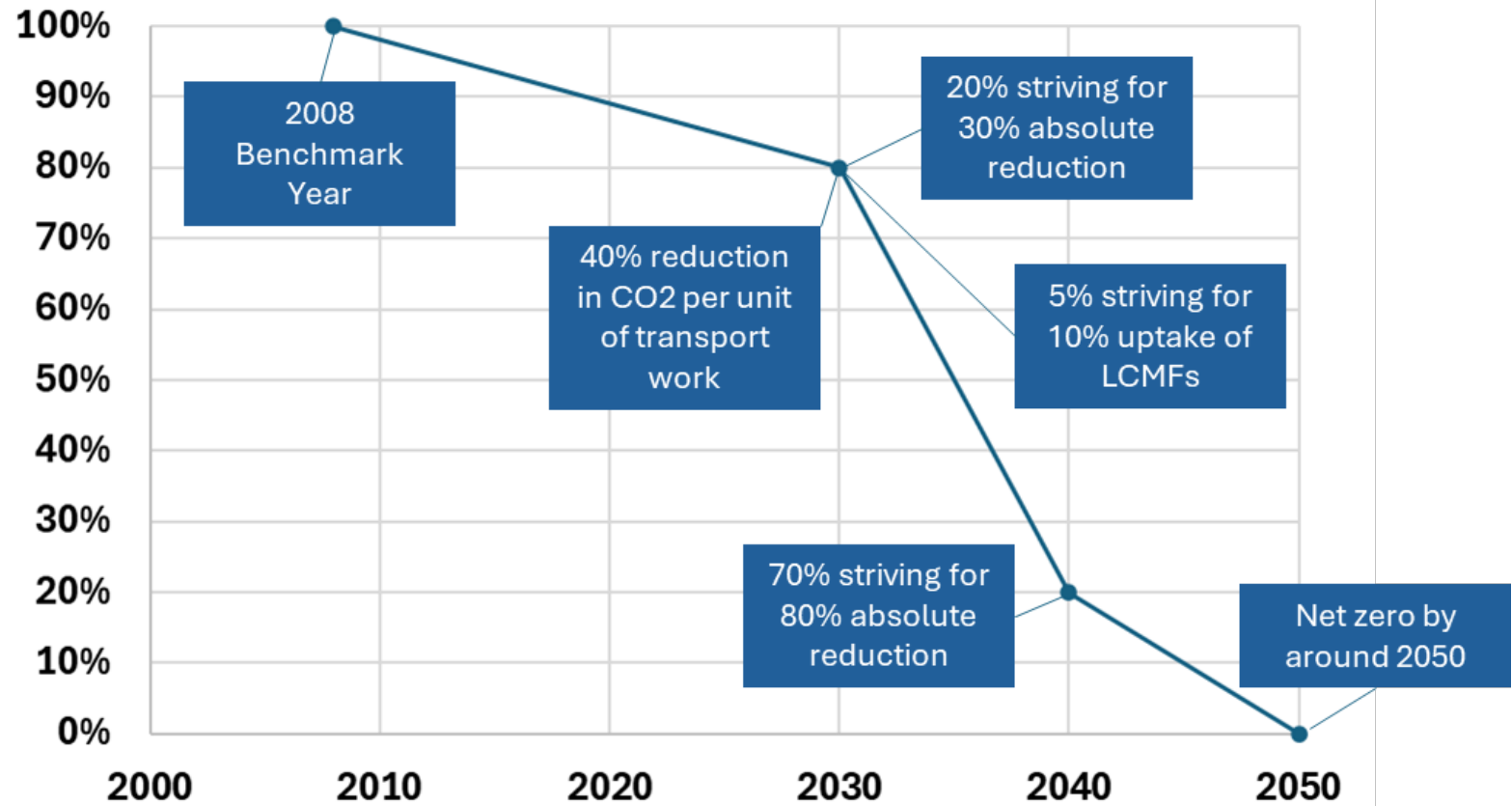
Áreas actuales de control de emisiones



- NOx regulado por Nivel según la edad del buque
- Se está llevando a cabo un esfuerzo de MEPC para reforzar la regulación de NOx
- Iniciado por un grupo de trabajo de 8 países que tiene como objetivo propuesta definitiva para 2027
- Problema – ningún país del Este de Asia (principales rutas comerciales de EE. UU.) participa



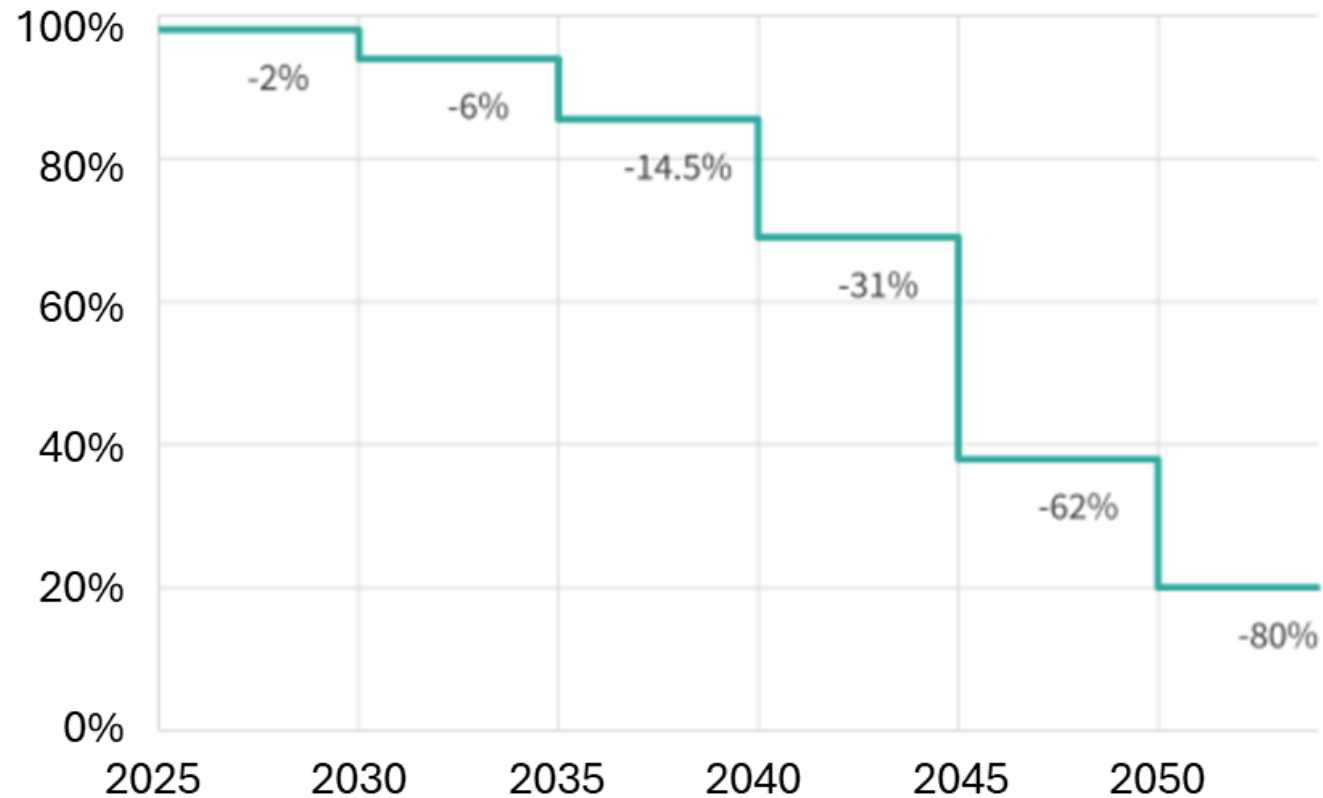
- **Combinación de medidas técnicas y económicas, como un estándar de intensidad de carbono de combustible y un mecanismo de precios/recompensa.**
- **Nuevo capítulo previsto para que el Anexo VI de MARPOL haga medidas vinculantes pospuestas en la reunión de la MEPC de octubre de 2025**
- **Impacto en el plan para la entrada en vigor el 1 de marzo de 2027, con la primera notificación bajo las nuevas normas comenzando en 2028 por determinar.**



Fuente: OMI

- La regulación FuelEU Marítima es un Estándar de Intensidad de Carbono
- Sistema de Comercio de Emisiones de la UE (ETS, por sus siglas en Inglés) fue establecido para facilitar el cumplimiento

Reducción obligatoria de la intensidad de carbono del combustible



Fuente: Lloyd's Register

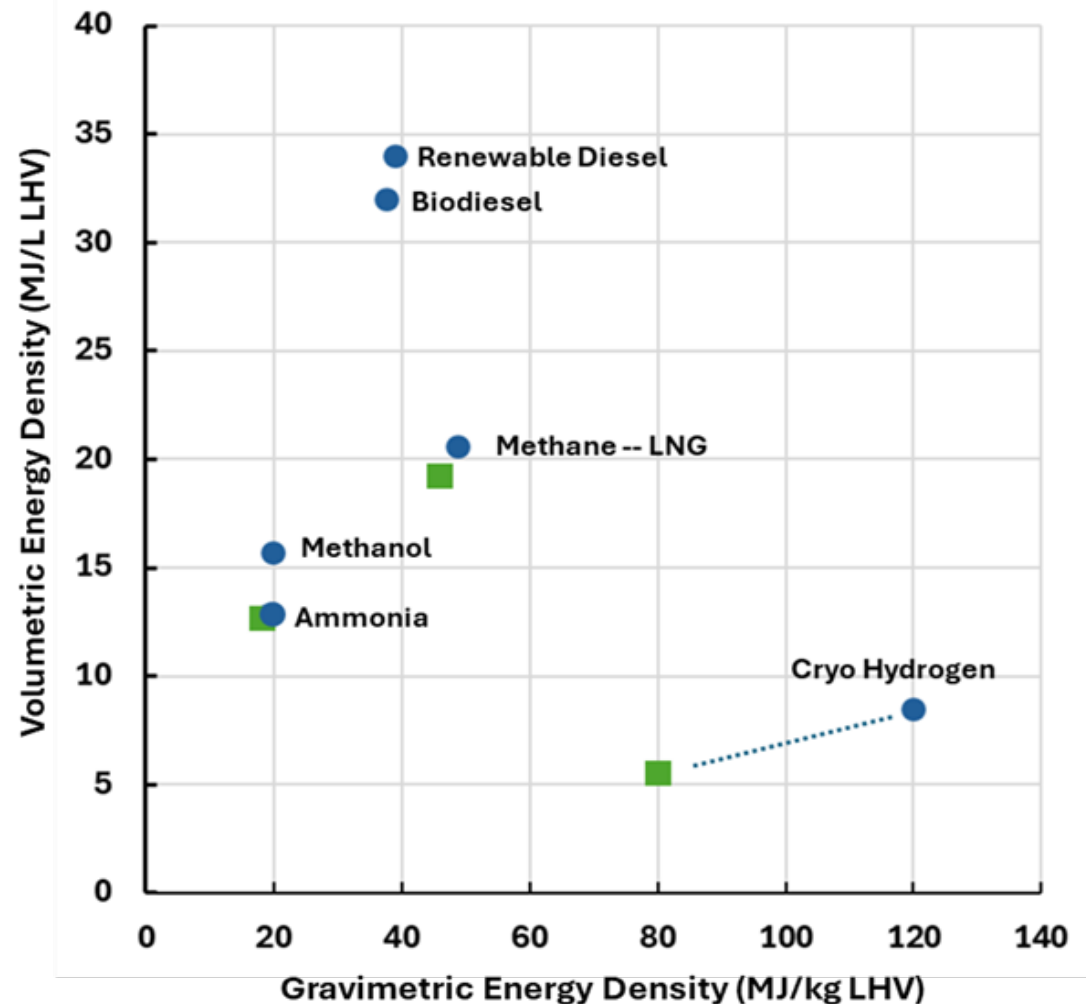
- Los principales fabricantes de motores marítimos están desarrollando motores para operar con LCMF y varios ya han sido certificados
- 11 de los 15 grandes constructores navales se han comprometido a hacer la transición para construir únicamente embarcaciones de cero emisiones de GEI para 2050
- Numerosos puertos cuentan con iniciativas de "puertos limpios" de varios tipos, pero muchos se centran en emisiones en el atraque, operaciones en tierra y embarcaciones portuarias
- Se han anunciado 62 Corredores de Envío Verdes centrados en los OGV, pero la reducción de carbono es el enfoque
- Muchos de los mayores clientes globales de transporte marítimo tienen compromisos con envíos bajos o nulos de carbono – 35 grandes marcas minoristas se han comprometido a comprar solo envíos con combustible cero carbono para 2040

- Los retos de California para cumplir con los estándares de emisión de los criterios son únicos – ninguna otra jurisdicción está tan centrada en abordar las emisiones no relacionadas con GEI para cumplir con los niveles federales de logro y objetivos de salud pública
- Prácticamente todos los LCMF tienen un contenido de azufre ultra bajo y la mayoría tienen baja tendencia a formar PM, lo que proporciona una sinergia significativa con los esfuerzos de California
- Sin embargo, cumplir con los estándares de NOx requerirá sistemas de postratamiento
- Hay varias áreas en las que California puede ejercer influencia para apoyar sus objetivos:
 - Apoyar los esfuerzos continuos para aumentar la rigurosidad de las regulaciones de emisiones de NOx del Anexo VI de MARPOL
 - Actualmente no existen ECAs en el Este de Asia. Apoyar el establecimiento de ECAs en el Este de Asia introduciría requisitos de control de emisiones de NOx y SOx en ambos extremos de la mayoría de los viajes hacia y desde California
 - Los Corredores de Envío Verdes suelen estar muy centrados en los GEI. California podría considerar financiar proyectos piloto para asegurar que las emisiones no relacionadas con GEI se incluyan en los objetivos de ores verdes.

Evaluación de la disponibilidad de combustibles marítimos

- Características clave de LCMF:
 - Hidrógeno (H_2) = debe almacenarse como crio-líquido; propenso a fugas y altamente inflamable
 - Gas Natural Licuado (GNL) -- (Metano (CH_4)) = crio-líquido, el deslizamiento de metano es un problema potencial
 - Amoníaco (NH_3) = líquido bajo presión moderada; tóxico y corrosivo
 - Metanol (CH_3-OH) = líquido a temperatura ambiente
 - Los biocombustibles, incluyendo el biodiésel (FAME) ($CH_3(CH_2)_n-COOCH_3$) y el diésel renovable ($CH_3(CH_2)_nCH_3$) (HVO) = pueden aprovechar la infraestructura existente y requieren modificaciones moderadas o nulas al motor

- La baja densidad volumétrica de energía es un reto para la mayoría de los LCMF

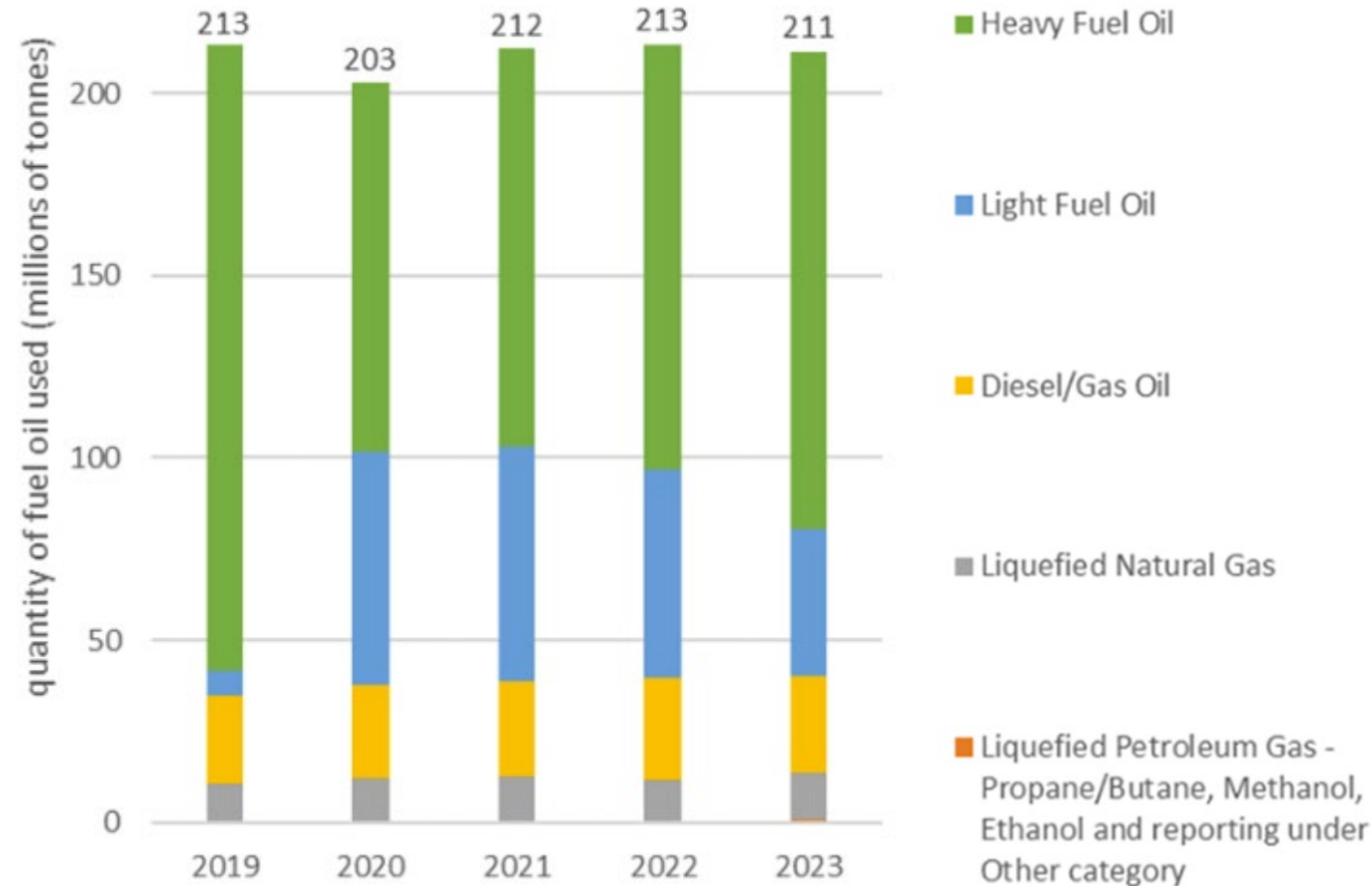


Los cuadrados verdes incluyen energía de licuefacción cuando es necesaria

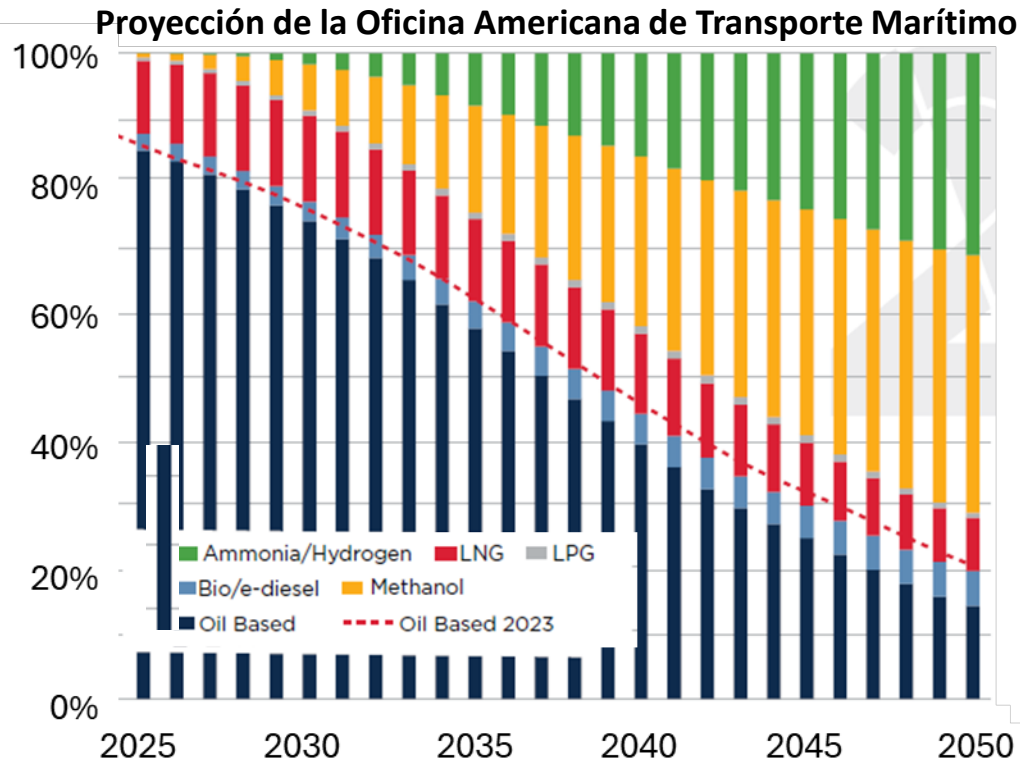
Fuente: American Bureau of Shipping y UCI

- Actualmente, el GNL constituye alrededor del 5% del consumo de combustible marino en el sector marítimo internacional (embarcaciones de más de 5.000 GT) – otros LCMF están en fase piloto

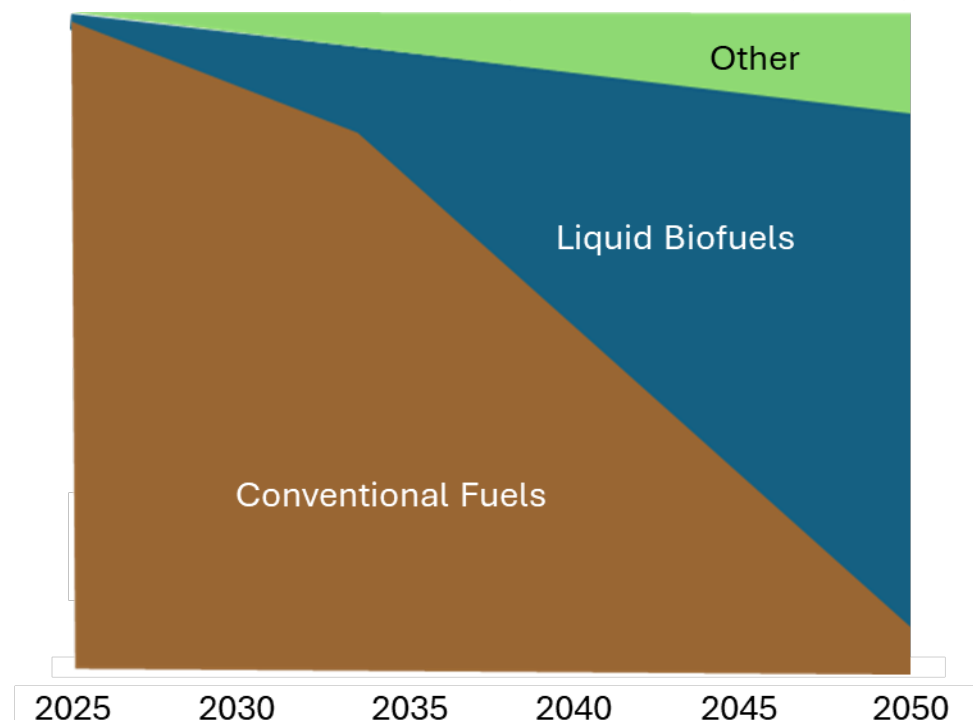
Consumo de combustible por combustible en embarcaciones grandes



- Las proyecciones a largo plazo son mixtas -- muchos estudios proyectan que el amoníaco o el metanol serán el combustible dominante más allá de 2050, pero muchos otros favorecen los biocombustibles líquidos

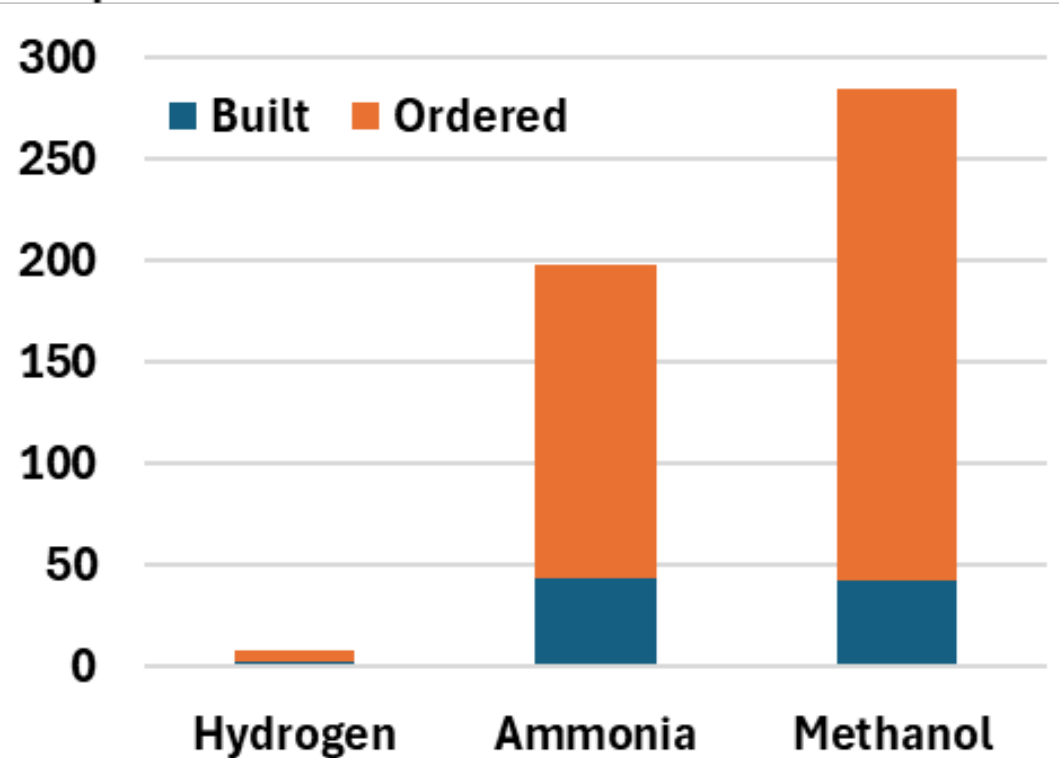


Escenario de Biocombustibles Líquidos Altos de Lloyd's Register



- Entre los combustibles más ligeros, el metanol está experimentando una actividad significativamente mayor que el amoníaco

Ship Count

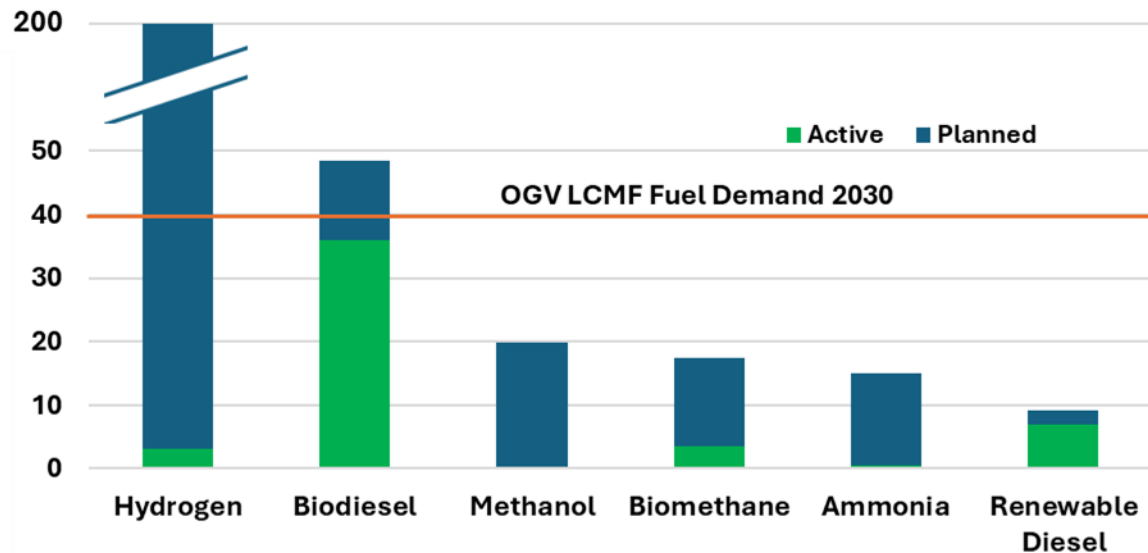


Fuente: Carr et al. 2024

UCI Oferta y demanda

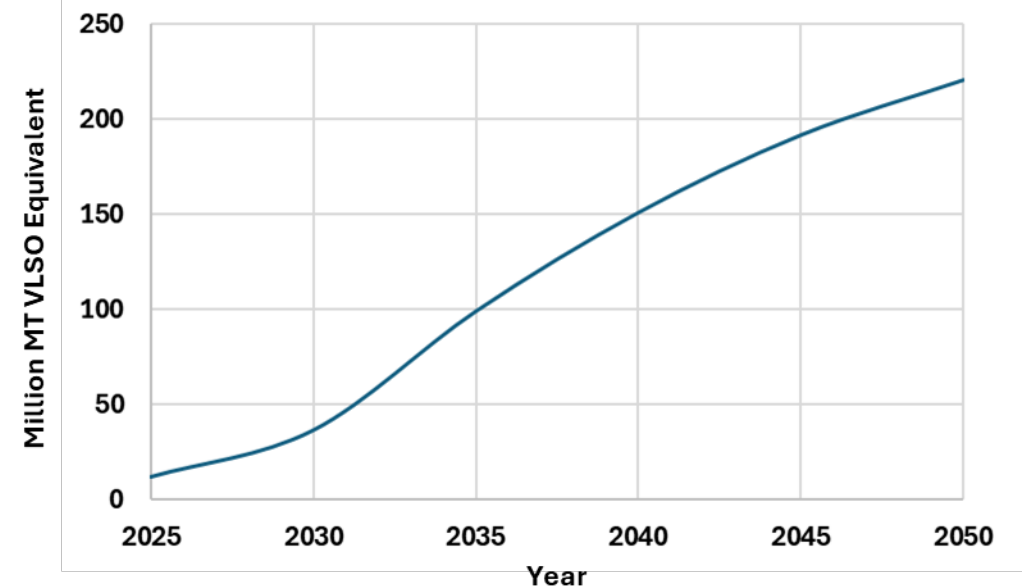
- En conjunto, la capacidad activa y planificada de LCMF supera la demanda en 2030
- Independientemente de qué combustibles sean dominantes en el sector marítimo en 2050, será necesaria una gran capacidad de producción y una ampliación de infraestructura

Capacidad activa y planificada de LCMF en 2030 vs. demanda



Fuente: Múltiples fuentes

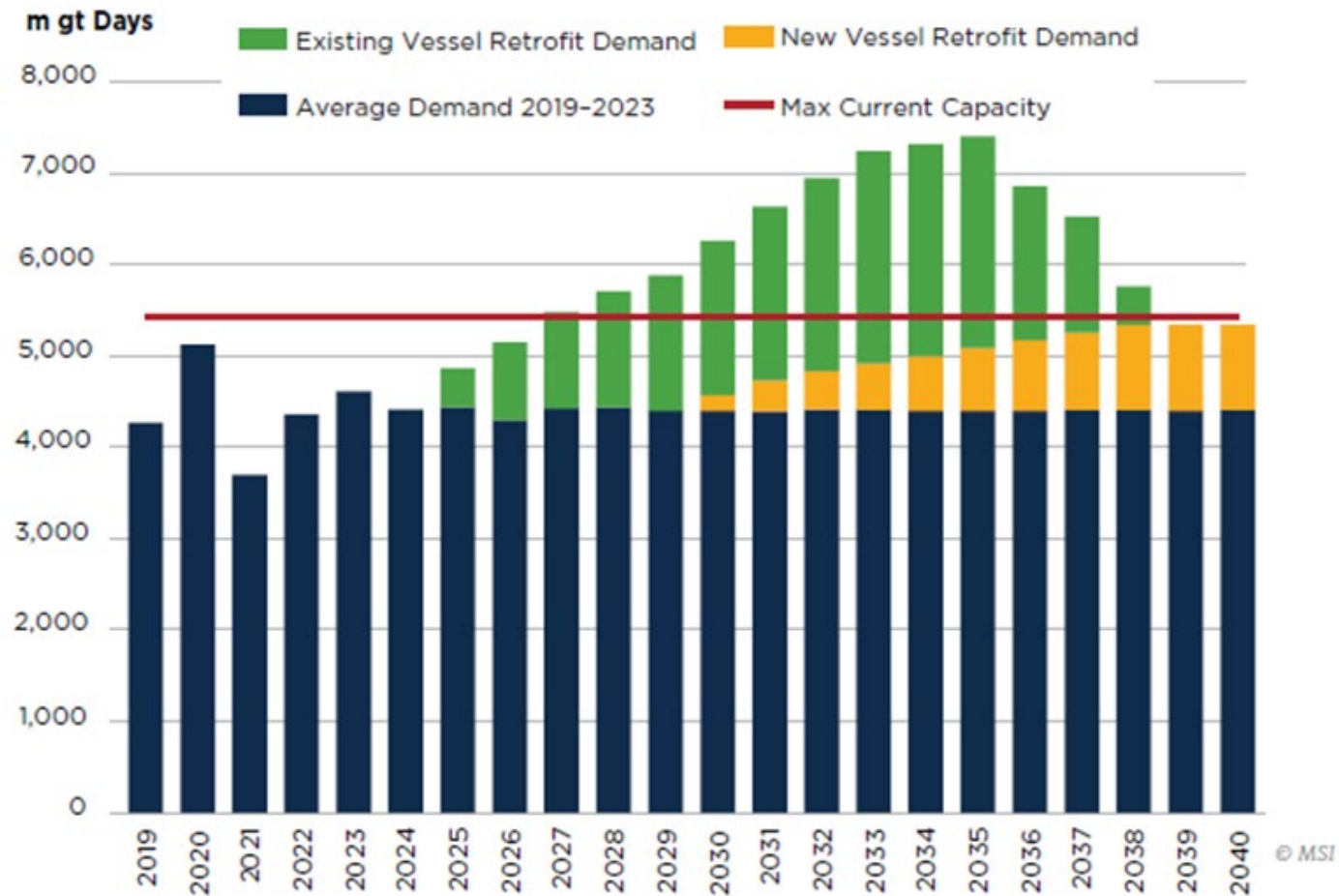
Proyección global de la demanda de LCMF consistente con los objetivos de la OMI



Fuente: UCI

- Un estudio concluye que la capacidad de construcción naval será una limitación para el uso ampliado de los LCMF en la década de 2030

Capacidad del astillero y demanda proyectada



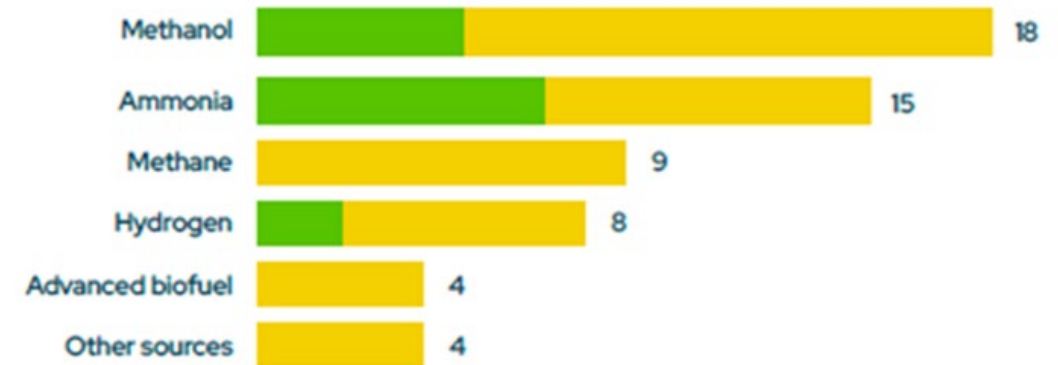
Fuente: Carr et al. 2024

- El hidrógeno y el amoníaco presentan los mayores desafíos de repostaje, aunque todos los LCMF están pasando por una planificación y pruebas piloto significativas a través de iniciativas del Corredores Verdes

Requisitos de repostaje de LCMF y grado de desafío

Combustible	Distribución y almacenamiento	Repostaje
Fuelóleos	<u>Bajo</u> - Puede utilizar instalaciones existentes de distribución y almacenamiento para combustible destilado	<u>Bajo</u> - Puede utilizar la infraestructura de repostaje existente para combustible destilado
Metano	<u>Bajo</u> - Puede utilizar instalaciones de distribución y almacenamiento existentes (y aún en desarrollo) para GNL	<u>Bajo</u> - Puede utilizar la infraestructura de repostaje existente (y aún en desarrollo) para GNL
Hidrógeno	<u>Alto</u> - Infraestructura de distribución y almacenamiento muy limitada (asociada a la refinación y la fabricación de productos químicos) Numerosos planes internacionales para la construcción de infraestructuras H2 en 2030	<u>Alto</u> -- No existe infraestructura de repostaje Se han demostrado operaciones locales de repostaje
Metanol	<u>Low</u> - Puede basarse en las instalaciones existentes de distribución y almacenamiento de la red global de terminales, utilizadas para el comercio y transporte global de metanol	<u>Medio</u> - Infraestructura de repostaje parcialmente desarrollada en 90 puertos de todo el mundo La demostración de las operaciones de repostaje ha sido exitosa, y el repostaje de barco a barco comprobado
Amoníaco	<u>Bajo</u> - Puede aprovechar las instalaciones existentes de distribución y almacenamiento de la red global de terminales, utilizadas para el comercio/transporte global de amoníaco	<u>Alto</u> -- No existe infraestructura de repostaje Se han demostrado operaciones locales de repostaje

Combustibles planificados para su uso en Corredores de Envío Verdes
Verde = Combustible Único Amarillo = Uno de los Múltiples Combustibles



**Low- or zero-emission variants of the fuels only*

Fuente: Foro Marítimo Global

- La cartera de instalaciones de producción de LCMF activa y planificada es adecuada para satisfacer las proyecciones de demanda hasta 2030, suponiendo que todos los proyectos se materialicen
- Más allá de 2030, la expansión de la oferta debe alcanzar un ritmo factible (comparable a la rápida expansión del suministro de combustible visto en el pasado) pero desafiante
- La nueva capacidad de abastecimiento para los no fuelóleos será más desafiante que para los fuelóleos, pero se están llevando a cabo acciones iniciales para establecer protocolos y ampliar la capacidad
- La capacidad en el astillero puede suponer una limitación para el crecimiento de la demanda de LCMF basada en la capacidad actual del astillero y sin tener en cuenta el desplazamiento de la actividad "convencional" en astillero por la actividad de reacondicionamiento de LCMF
- Aunque se necesita una acción internacional significativa y coordinada, la oferta de LCMF puede en principio satisfacer el crecimiento de la demanda necesario para cumplir con los objetivos de descarbonización de la OMI

- **Realizar investigaciones adicionales centradas en:**
 - Mejorar la comprensión de las trayectorias de capital, operaciones y costos del ciclo de vida a medida que las tecnologías maduran y escalan, incluyendo los efectos de las curvas de aprendizaje, la estandarización, el desarrollo de la cadena de suministro y los riesgos económicos de la adopción temprana, como activos varados y bloqueo tecnológico.
 - Desarrollar una orientación más clara sobre cuándo las reformas son técnicamente y económicamente viables frente a cuándo se prefieren las nuevas construcciones.
 - Mejorar la caracterización del rendimiento real de emisiones para motores de combustibles alternativos bajo cargas, rutas y ciclos de trabajo variables
 - Aclaración de la durabilidad a largo plazo del motor, el rendimiento en el control de emisiones y la integración del sistema bajo una operación comercial sostenida con OGV para motores de combustibles alternativos como metanol y amoníaco.
 - Los avances técnicos para apoyar las tecnologías emergentes muestran un potencial a largo plazo para un sector marítimo de casi cero y cero emisiones, incluyendo baterías, pilas de combustible de hidrógeno y embarcaciones alimentadas por energía nuclear.
 - Evaluar cómo las tecnologías emergentes se alinean con la infraestructura portuaria, de combustible y eléctrica existente
 - Seguimiento de la evolución del suministro de combustible y la capacidad de repostaje
 - Seguimiento de la evolución de los corredores verdes y las iniciativas relacionadas a medida que maduran
- **Desarrollar y llevar a cabo una estrategia de compromiso (p.ej., con la EPA de EE. UU.) para influir en las regulaciones internacionales de NOx y SOx a través de la OMI**

- Proporcione sus comentarios por correo electrónico antes del 20 de febrero de 2026

Jeff Reed – jgreed@uci.edu

Mike MacKinnon – mam@apep.uci.edu