

OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS EN LA TRANSICIÓN HACIA LA ELECTROMOVILIDAD MARÍTIMA EN CHILE

Joel Pérez Osses^{1*}, Marcelo Pérez², Carlos Reusser³, Claudio Troncoso¹, Héctor Young⁴

¹ Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

² Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

³ Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile

⁴ Universidad de La Frontera, Temuco, Chile

*Autor para
correspondencia:
joelperez@uach.cl

RESUMEN

Una limitación actual del transporte marítimo en Chile es el bajo nivel de desarrollo tecnológico de la industria naviera, particularmente en cuanto a sistemas propulsivos. Se depende de tecnologías con baja eficiencia, lo que es agravado por el continuo aumento en el consumo de combustibles fósiles y el impacto ambiental asociado. El Ministerio de Energía de Chile ha propuesto medidas para fomentar el desarrollo de tecnología y para reducir la dependencia de combustibles fósiles, siendo el primer paso hacia la electromovilidad la transición gradual de sistemas de propulsión convencionales, a sistemas de propulsión híbridos eléctricos. Estos sistemas permiten aumentar la eficiencia del sistema de transporte sin requerir un cambio completo del actual sistema de propulsión, propiciando un transporte marítimo eficiente y sustentable. Este artículo presenta un análisis basado en literatura reciente, con el objetivo de identificar las barreras que dificultan la implementación a gran escala de sistemas de propulsión híbridos. A partir de esta investigación se concluye que la implementación de sistemas de evaluación experimental de propulsión híbrida a escala reducida es una herramienta necesaria para facilitar la adopción de esta tecnología por parte de la flota naviera nacional.

Palabras clave Electromovilidad marítima, sistemas propulsivos convencionales, sistemas propulsivos híbridos y eléctricos, eficiencia y sustentabilidad.

ABSTRACT

A current limitation of maritime transport in Chile is the low level of technological development of the shipping industry, particularly in terms of propulsive systems. This depends on low efficiency technologies and is aggravated by the continuous increase in the consumption of fossil fuels and its associated environmental impact. The Chilean Ministry of Energy has proposed measures to encourage the development of technology and to reduce dependence on fossil fuels. The first step towards electromobility could be the gradual transition from conventional propulsion systems to hybrid electric propulsion systems. These systems allow increasing the efficiency of the transport system without requiring a complete change of the current propulsion system, promoting efficient and sustainable maritime transport. This article presents an analysis based on recent literature, with the aim of identifying the barriers that hinder the large-scale implementation of hybrid propulsion systems. Based on this research, it is concluded that the implementation of reduced-scale hybrid propulsion experimental evaluation systems is a necessary tool to facilitate the adoption of this technology by the national shipping fleet.

Keywords Marine electromobility, conventional propulsion systems, hybrid and electric propulsion systems, efficiency, and sustainability.

J. Pérez Osses, V. Palma, M. Pérez, C. Reusser, C. Troncoso, H. Young

1. INTRODUCCIÓN

El transporte marítimo nacional está marcado por el bajo desarrollo tecnológico de la industria naviera y marítima, especialmente respecto a sistemas propulsivos, adaptando tecnología con bajos niveles de eficiencia lo cual se traduce en el continuo aumento del consumo de combustibles fósiles, con el impacto ambiental que esto representa. El Gobierno de Chile a través del Ministerio de Energía se encuentra impulsando la electromovilidad del transporte nacional, siendo esta aplicada a todo medio de transporte, para impulsar el desarrollo de tecnología y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. El primer paso hacia la electromovilidad es el recambio de los sistemas de propulsión convencionales basados en motores de combustión interna (CI) conectados directamente al propulsor, por el uso de sistemas de propulsión híbridos y eléctricos que permite por una parte aumentar la eficiencia del transporte reduciendo las emisiones y, por otro lado, promover la utilización de fuentes de energía alternativa. En este sentido, los sistemas de propulsión híbridos, que permiten aumentar la eficiencia del sistema de transporte sin requerir un cambio completo del actual sistema de propulsión, cobran vital importancia para propiciar la transición hacia un transporte eficiente y sustentable.

Un sistema de propulsión se define como híbrido cuando combina, a diferentes graduaciones, sistemas propulsivos convencionales térmicos con motores eléctricos. La Ilustración 1 presenta una configuración genérica de planta de propulsión híbrida para una embarcación. La configuración considera una combinación de motores CI y motores eléctricos para el servicio y apoyo a bajas potencias de servicio. La interfaz entre los generadores y los motores eléctricos se lleva a cabo mediante convertidores electrónicos de potencia para permitir un control flexible y eficiente de la propulsión.

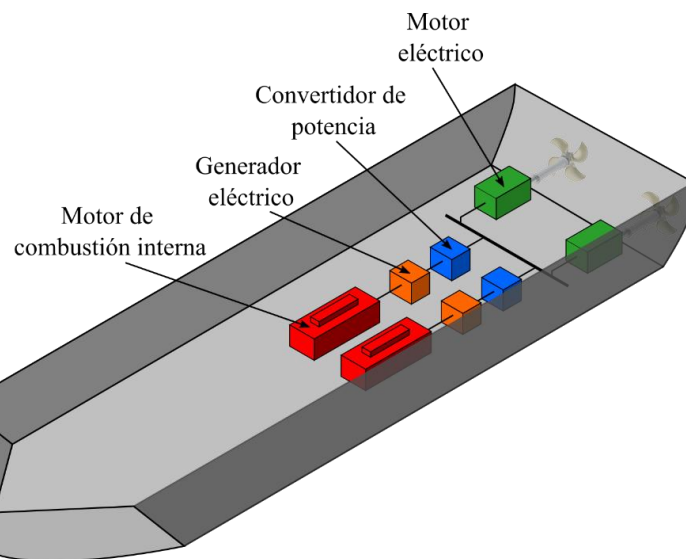


Ilustración 1 Esquema genérico de una planta propulsora híbrida.

El transporte marítimo nacional proyecta y construye embarcaciones para soportar industrias tan diversas como el turismo, el desarrollo acuícola y el transporte de mercancías a lo largo de todo el país desde y hacia sus puertos principales (SOFOFA, 2022). El transporte marítimo es un medio ampliamente utilizado en el país, el cual, considerando su geografía, adquiere una importancia estratégica. El transporte marítimo nacional considera el transporte de carga general, granel, peces

Oportunidades y desafíos en la transición hacia la electromovilidad marítima en Chile

vivos y líquidos, siendo 154 millones de toneladas las transportadas el año 2018 (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, 2022). Otras actividades como el transporte de personas en zonas aisladas, faenas de pesca artesanal e industrial, la salmonicultura y el turismo aportan al transporte marítimo nacional. Para lograr este posicionamiento, la industria naviera y marítima ha promovido la construcción de embarcaciones de diversos tipos para satisfacer la demanda por este medio de transporte.

Un problema presente en el transporte marítimo nacional es el ineficiente consumo de combustibles fósiles, tanto para sus sistemas propulsivos como para sus sistemas auxiliares, redundando en una baja flexibilidad operacional. Estos combustibles fósiles se encuentran asociados mayoritariamente a motores CI de 2 y 4 tiempos bajo rangos de potencias que varían desde los 100 kW a los 2.500 kW para embarcaciones menores, pero también encontrándose embarcaciones mercantes cuyas potencias instaladas superan los 10 MW (Clarksons, 2022; DIRECTEMAR, 2020). La problemática, por lo tanto, se enfoca en disminuir el consumo de combustibles fósiles que conlleva a una menor generación de gases de efecto invernadero (GEI) y sustancias relevantes como el material particulado y óxidos de nitrógeno (NOx). También se asocia con un recambio de sistemas propulsivos y auxiliares convencionales por sistemas más flexibles y eficientes como las plantas propulsoras híbridas, operacionalmente asociados a la categoría de electromovilidad marítima.

El resto de este artículo está organizado como sigue. En la sección 2 se detallan los problemas asociados a sistemas propulsivos convencionales para embarcaciones y que motivan la transición hacia la electromovilidad marítima. En la sección 3 se presenta una revisión bibliográfica que abarca el desarrollo actual tanto en Chile como en el resto del mundo de sistemas de electromovilidad marítima, junto a las tecnologías que recientemente se han utilizado como apoyo al desarrollo de estos sistemas propulsivos. Finalmente, la sección 4 contiene las conclusiones de este trabajo.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Si bien la electromovilidad considera el recambio a sistemas propulsivos completamente eléctricos, la industria naviera y marítima es una industria reticente al cambio. Por lo que el problema no es solamente promover la electromovilidad marítima, sino que lograr que la transición desde los sistemas propulsivos existentes a los eléctricos sea de tal forma que permita a la industria capear los altos costos constructivos de estos nuevos sistemas eléctricos de una manera sustentable y acorde a los planes de eficiencia y política energética presentados por el Gobierno de Chile (Gobierno de Chile, 2022; Ministerio de Energía, 2022a) y a la Estrategia Nacional de Electromovilidad (Ministerio de Energía, 2022b).

La eficiencia de las embarcaciones está basada en el consumo de combustible con respecto a las capacidades de carga y siempre considerando tanto el sistema propulsivo como el sistema de conversión de energía que la determina. La eficiencia del sistema de propulsión convencional varía entre un 38% y un 41% para un rango de potencias entre los 100 kW y los 2.500 kW, para embarcaciones mayores a estas potencias la eficiencia aumenta hasta un 48% (Griffiths, 1999; Wik, 2010). Sin embargo, este nivel de eficiencia puede y debe ser optimizado. La baja eficiencia se ve adicionalmente afectada por la variabilidad de los regímenes de operación y carga a los que son sometidos los motores CI. Esta variabilidad genera un aumento del consumo específico de combustible, lo que provoca mayor generación de emisiones y un desperdicio de energía a través

J. Pérez Osses, V. Palma, M. Pérez, C. Reusser, C. Troncoso, H. Young

de los gases de escape y de los sistemas de enfriamiento (Griffiths, 1999). Por ejemplo, la diferencia de consumo de combustible entre un sistema de propulsión y auxiliar convencional y uno híbrido y/o eléctrico es de alrededor de 19% para el tipo de motores instalados en algunas de las embarcaciones de la flota nacional considerada en esta revisión, lo que equivale a unos consumos específicos de combustible entre 170 g/kWh y 210 g/kWh (MAN Diesel & Turbo, 2013; Woud & Stapersma, 2002). Evaluando estos consumos específicos de acuerdo con el tipo de combustible y su contenido de carbono, teóricamente se podría reducir la generación de CO₂ una vez se definan las cargas a las cuales trabajan las plantas de propulsión y auxiliares. En números, si el motor diésel está consumiendo combustible cuyo contenido de carbono es 3.206 g-CO₂/g-FO (MEPC, 2012a) las emisiones de CO₂ se podrían disminuir en 131 g-CO₂/kWh. Poder cuantificar el impacto en cuanto a disminución de consumo de combustible y de las emisiones que se reducirían, permitiría reducir la incertidumbre de lograr una aplicación de una planta híbrida, solventar la inversión de su hibridación y tener certeza de las ventajas de esta en cuanto a mejoras operacionales.

La flota nacional actual es de aproximadamente 82.000 embarcaciones, tanto mercantes como de servicio, pesca y recreacionales (DIRECTEMAR, 2020) lo cual es una gran oportunidad de futuro desarrollo. Esta revisión considera trabajar con dos tipos de embarcaciones: embarcaciones de apoyo a la industria acuícola y remolcadores de puerto, de las cuales existen 598 y 74 en operación, respectivamente, según el Registro de Naves. Estos números permiten considerar la reconversión y optimización de dichas embarcaciones aplicando la electromovilidad marítima como un objetivo cuantificable.

El análisis del perfil operacional de este tipo de embarcaciones ha demostrado que son altamente ineficientes. La Ilustración 2 muestra el perfil operacional de un remolcador donde se puede apreciar que durante largos periodos el sistema propulsivo opera a bajas potencias de servicio donde es más ineficiente, lo que implica un alto consumo de combustible y un alto nivel de generación de emisiones.

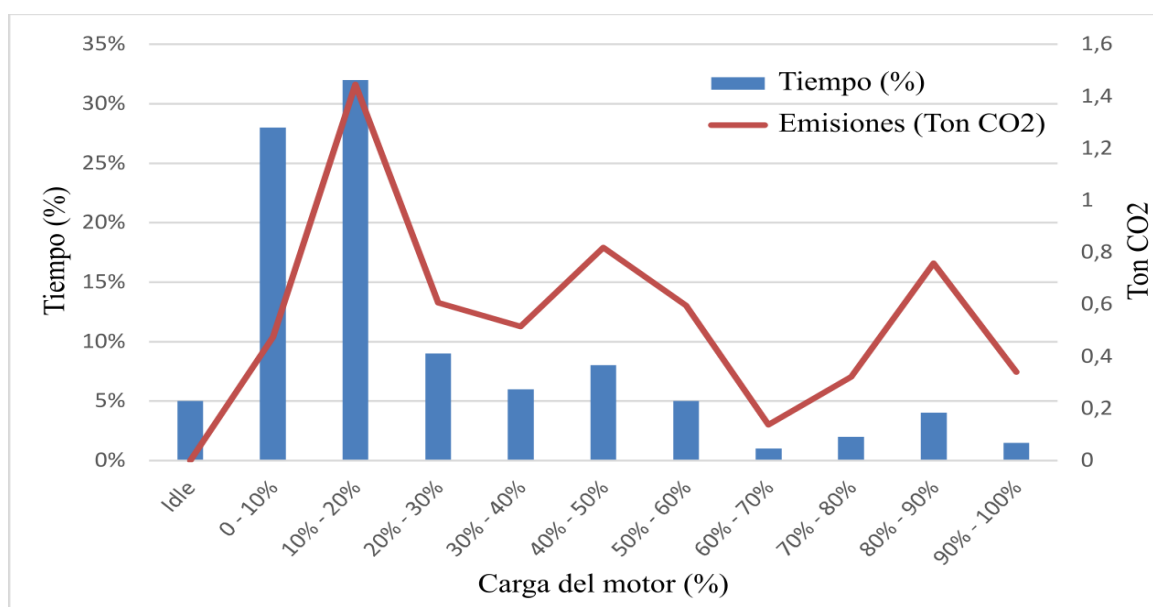


Ilustración 2 Perfil operacional de un remolcador de puerto.

Oportunidades y desafíos en la transición hacia la electromovilidad marítima en Chile

El uso de combustibles fósiles es un problema difícil de abatir, pero es posible al obtener una cuantificación de su consumo proponiendo opciones reales para disminuirlo en el corto, mediano y largo plazo gracias a la hibridación de la planta propulsora. Una nueva oportunidad se presenta al respecto por las capacidades de poder extrapolar los resultados considerando el usar combustibles alternativos y sistemas híbridos más complejos o completamente eléctricos. Algunos combustibles alternativos que pueden ser considerados son el amoníaco, metanol, gas natural, biocombustibles e hidrógeno que tienen menor o cero-huella de carbono lo que permitiría reducir aún más el impacto medioambiental de la implementación de plantas híbridas. Sistemas híbridos más complejos o completamente eléctricos considerarían el uso de un banco de baterías que permita reducir la demanda de generación eléctrica de las embarcaciones en periodos en que no esté en servicio usando un cargador rápido en el puerto. Como se mencionó previamente la hibridación es un proceso que conduce a oportunidades de optimización cuantificables.

La nueva normativa de la Organización Marítima Internacional demanda que al 2050 el transporte marítimo esté libre del consumo de combustibles fósiles (IMO, 2022a). Si bien lograr un cambio de tipo de combustible es posible, el real impacto de la conversión necesita ser evaluado y el desarrollo de una planta híbrida a escala apunta a proveer una estimación de los efectos de este cambio. El uso de motores eléctricos en reemplazo de los motores de combustión interna ha sido considerado como una forma ejemplificadora de aumento de eficiencia de las embarcaciones. Estos motores tienen la capacidad de operativizar embarcaciones en forma eficiente donde la única consideración es cómo se lleva a cabo la generación de electricidad a bordo. Aunque la generación de electricidad a bordo considera el uso de grupos generadores con motores CI, estos operan con cargas estables, evitando la variabilidad del consumo de combustible, optimizando la eficiencia y minimizando sus emisiones.

Una planta híbrida es una de las mejores opciones tecnológicas y de operación de embarcaciones para lograr mejoras de eficiencia energética asociadas a electromovilidad en el corto plazo. Sin embargo, ha sido y está siendo aplicada bajo condiciones de estudio caso a caso lo que no permite su masificación y estandarización. Sistemas de evaluación sistemática, tales como una planta híbrida a escala piloto son herramientas adecuadas para evaluar diferentes alternativas propiciando la generación de eficiencia energética asociada a electromovilidad general, considerando embarcaciones con potencial de adaptación en plazos acotados. Este tipo de planta propulsora experimental permitiría cuantificar las emisiones generadas por el transporte marítimo y así conocer en cuánto será posible de reducir ayudando a los planes de descontaminación hacia el 2022 (Ministerio del Medio Ambiente, 2022). Los planes del Gobierno de Chile apuntan a una reducción del 30% de las emisiones de GEI para el año 2030, los cuales sería posible de lograr reduciendo el consumo de combustibles fósiles por parte de la industria naviera y marítima.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A continuación, se presenta una revisión bibliográfica con la finalidad de identificar el estado de desarrollo de la electromovilidad marítima a nivel mundial, así como los obstáculos a superar en la ruta hacia una adopción a mayor escala de estas tecnologías.

La electromovilidad marítima no es un concepto nuevo, ha sido implementado desde los años 60' pero bajo la premisa de configurar y establecer sistemas propulsivos híbridos y completamente

J. Pérez Osses, V. Palma, M. Pérez, C. Reusser, C. Troncoso, H. Young

eléctricos. No se consideraban los sistemas auxiliares ni tampoco aspectos relacionados a la forma de consumir los combustibles para lograr el cometido final de un sistema de propulsión.

Según se identificó en la sección anterior, uno de los problemas que se debe enfrentar es la falta de información fidedigna, basada en métodos reproducibles, que permita asesorar a la industria naviera y marítima nacional en el proceso de instalación de sistemas propulsivos híbridos en embarcaciones nuevas y existentes.

El concepto de electromovilidad está arraigado en el uso de plantas propulsoras híbridas y completamente eléctricas. Por lo tanto, en este análisis bibliográfico se considera el desarrollo a nivel mundial y nacional de sistemas de electromovilidad. Luego se centrará en herramientas que son usadas en la actualidad para apoyar la investigación y el desarrollo de sistemas de electromovilidad en base a plantas híbridas escalables. Otro aspecto de interés para esta propuesta, y que es incluido en esta revisión, es el de las normativas internacionales vigentes que han motivado los planes estratégicos del Estado de Chile en el ámbito de la electromovilidad marítima.

3.1 Desarrollo de electromovilidad marítima a nivel mundial

Actualmente, la electromovilidad marítima está presente en la forma de la Estrategia Nacional de Electromovilidad que considera la transformación de los sistemas propulsivos convencionales a sistemas propulsivos del tipo híbridos y completamente eléctricos (Ministerio de Energía, 2022b). Este último sistema propulsivo es considerado sólo para embarcaciones nuevas. Los sistemas híbridos, por su parte, están considerados para optimizaciones de embarcaciones existentes y para embarcaciones nuevas. En el ámbito internacional, las plantas híbridas y completamente eléctricas se han desarrollado como alternativa para aquellas embarcaciones que requieren un perfil de operación condicionado donde es necesaria una gran capacidad de generación de poder eléctrico para los servicios auxiliares durante navegaciones de alta demanda de velocidad y autonomía (Gupta et al., 2009; Kowalski et al., 2013; McCoy & Amy Jr., 2009; Zhai et al., 2007).

Las plantas propulsivas eléctricas han sido desarrolladas mayoritariamente en países europeos, donde Noruega lidera los proyectos de este tipo. Esta configuración de sistema propulsivo contiene bancos de baterías y frecuentemente la generación de electricidad en puerto proviene de energías renovables no convencionales (ERNCC) por lo que la generación de emisiones en toda la cadena de servicio de las embarcaciones es casi nula (European Environment Agency, 2013). Por otro lado, existe un constante apoyo en cuanto a subvenciones por parte de los gobiernos europeos a la industria naviera y marítima para poder implementar proyectos de electromovilidad marítima.

La Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) ha establecido un grupo de trabajo respecto a la electromovilidad marítima, dicho grupo ha creado un portafolio de proyectos completamente eléctricos, pero también considerando proyectos híbridos logrando abarcar todo el espectro de opciones más masificadas hasta el momento. Este grupo de trabajo llamado Task 38 Group (IEA, 2022) forma parte de un proyecto a gran escala que la IEA ha establecido para fomentar y propiciar la electromovilidad marítima y del transporte en general.

El futuro de la propulsión de vehículos será en forma eléctrica, actualmente el uso de estos sistemas se puede apreciar en la industria del transporte en general (Begovic et al., 2022; Kim & Jeon, 2022;

Oportunidades y desafíos en la transición hacia la electromovilidad marítima en Chile

Kumar et al., 2019; Lloyd's Register & UMAS, 2022; McKinlay et al., 2021; Nguyen et al., 2021). En el área marítima las aplicaciones se han enfocado en dos sectores, que se diferencian por los rangos de potencia: menos de 60 kW, que corresponde a embarcaciones de recreo, mayoritariamente lanchas y yates; y potencias sobre los 3.000 kW, que corresponde a embarcaciones que navegan mar afuera prestando servicio a plantas petroleras, wellboats y embarcaciones de guerra.

La distribución de la flota mundial con plantas de propulsión híbridas y completamente eléctricas equivale a casi un 3% de la flota mundial de embarcaciones mercantes que son alrededor de 94.000 embarcaciones mayores (Clarksons, 2022). Este 3% equivale a aproximadamente 2.800 embarcaciones. La mayoría de estas embarcaciones son buques tanque, cruceros de pasaje, remolcadores y embarcaciones de apoyo a operaciones del tipo monocasco con esloras entre 24 m y 330 m. Como se puede desprender del estado de la flota mercante mundial, el uso de estas plantas se ha diseminado y adaptado a todo tipo de embarcaciones. Un factor importante es que aparte de los beneficios de eficiencia, existe una correlación con el desarrollo de normativas pertinentes al control de emisiones por parte de la flota mercante mundial (IMO, 2022c, 2022d, 2022e; MEPC, 2018) donde estas plantas de propulsión se han convertido en opción para embarcaciones de todo tipo.

3.2 Estado actual de la investigación en Chile

En la actualidad, las plantas de propulsión híbridas y completamente eléctricas consideran el uso de motores eléctricos donde a nivel nacional no se han encontrado mejoras desde el año 2008 cuando el Gobierno de Chile impulsó el programa de Introducción de Motores Eficientes que significó un 20% de descuento en el valor de la compra de motores eléctricos de alta eficiencia de fabricantes internacionales como Siemens, WEG y ABB (Gobierno de Chile, 2022). En el mismo contexto de motores eléctricos de alta eficiencia, el año 2016 CONICYT auspició el proyecto denominado “Desarrollo, Evaluación y Validación Tecnológica a Escala Semi-Industrial de un Motor Eléctrico de Alto Rendimiento para Aumentar la Producción y Mejorar la Eficiencia Energética en Minería”. Si bien está ligado a la industria minera, este tipo de motores eléctricos no difiere significativamente a los usados por las plantas de propulsión híbridas.

Por otro lado, la ciudad de Valdivia ha sido pionera en el establecimiento de opciones completamente eléctricas, transformándose en el eje primario con un proyecto del año 2012 que corresponde a la implementación de taxis fluviales que permiten la descongestión vehicular en la zona del puente Pedro de Valdivia que une el centro de la ciudad con la Isla Teja donde se encuentra el campus principal de la Universidad Austral de Chile (Alwoplast S.A., 2020).

En el año 2015, el astillero Nacional ASENNAV (ASENAV, 2020) construyó dos embarcaciones del tipo wellboat, usados para el transporte de carga viva, con potencia de los sistemas de propulsión híbridos entre los 1500 kW y 2500 kW. Si bien este es un ejemplo de las capacidades nacionales de implementación de plantas híbridas, el desarrollo técnico de la planta fue por parte del distribuidor ABB (ABB, 2016). Hasta la fecha, ningún nuevo proyecto con este tipo de tecnología aplicada se ha vuelto a desarrollar debido a los altos costos al ser una embarcación nueva.

J. Pérez Osses, V. Palma, M. Pérez, C. Reusser, C. Troncoso, H. Young

La Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) en los años 2009, 2011 y 2013 adjudicó tres proyectos con un grado de atingencia a la temática; el primero, diseño de embarcación híbrida multipropósito de apoyo a la industria salmonera; el segundo, desarrollo de un motor lineal a gas licuado para uso en generadores; y el tercero, un motor diésel de alta eficiencia (CORFO, 2022). Lamentablemente ningún antecedente de los resultados de estos proyectos fue posible de comprobar ya sea por medio de publicaciones, tesis, propiedad intelectual ni por medio de contacto directo con las instituciones beneficiadas.

A nivel nacional no existen proveedores ni desarrolladores de tecnologías para el desarrollo de la electromovilidad marítima, sólo existen proveedores internacionales y astilleros con capacidad de adquirir tecnología de sistemas propulsivos y aplicarla a embarcaciones. Bajo esta premisa sólo antecedentes de proveedores internacionales han sido considerados pensando en los costos de importación y de soporte para su instalación, servicio y posterior mantención. Los mayores proveedores internacionales son Wärtsilä (Wärtsilä, 2022), ABB (ABB, 2016) y Rolls Royce (Rolls Royce, 2022). Todos estos desarrolladores se enfocan sobre los 1500 kW de potencia instalada, sin consideraciones para potencias bajo este valor, lo que pudiese deberse a uno de los desafíos tecnológicos que presenta el desarrollo de plantas híbridas, que es la dificultad de proporcionar una configuración lo suficientemente rentable para bajas demandas de carga que la convierta en una opción de negocios viable para estos gigantes de los negocios tecnológicos. Esta poca apreciación del mercado al que apunta esta revisión permite identificar una oportunidad de desarrollo, al reducirse la incertidumbre de competir mercantilmente con empresas de larga data como las consideradas. Asimismo, actualmente no existe un servicio especializado en asesorar procesos de reconversión desde propulsión convencional a las de tipo híbrido, en particular considerando los rangos bajos de potencia que caracterizan a varias aplicaciones importantes en áreas productivas de la industria naviera y marítima nacional, lo cual constituye otra posible línea de desarrollo.

3.3 Metodologías para la investigación y desarrollo de sistemas de electromovilidad marítima

Tal como se ha podido apreciar en los párrafos anteriores, existen escasas referencias a metodologías orientadas a evaluaciones previas y asesoría en reconversión de plantas propulsoras híbridas. Esto es debido a que en los mercados tanto nacional como internacional los proyectos se desarrollan caso a caso. Se ha podido detectar que una de las razones de la reticencia de la industria naviera y marítima por adoptar medidas en torno a la electromovilidad son los costos iniciales asociados, dado que un sistema convencional es más barato cuando se compara con los híbridos y completamente eléctricos, por lo que lograr un cambio debe incluir un estudio de factibilidad y estudios cuantitativos incluyendo, además del costo económico, factores como la eficiencia en el consumo de combustible y las emisiones de GEI. Por otro lado, se debe hacer visible a la industria naviera y marítima las reducciones de costos a largo plazo en la operación y en mantención de sistemas propulsivos híbridos, debidos a un uso más eficiente de combustibles y al trabajo en puntos de operación óptimos.

En los últimos años se ha demostrado que la infraestructura de investigación orientada a probar nuevas configuraciones de propulsión es un factor clave para incentivar el cambio desde sistemas mecánicos convencionales a los eléctricos (Othman et al., 2019). Una ventaja de este enfoque es que permite evaluar las plantas existentes y determinar qué partes del equipamiento actual pueden

Oportunidades y desafíos en la transición hacia la electromovilidad marítima en Chile

reutilizarse dentro de la hibridación disminuyendo los costos y la incertidumbre en proyectos de reconversión. El uso de sistemas experimentales a escala permite emular fenómenos de carga complejos en condiciones de mar variables. Una conclusión relevante de estudios anteriores es que un sistema de pruebas con potencia nominal reducida de 22 kW pudo ser validado para representar el comportamiento de sistemas de propulsión de hasta 20 MW de potencia, dado que los modelos físicos subyacentes son idénticos (Apsley et al., 2008). Algunos esfuerzos se han orientado a la emulación de sistemas de propulsión totalmente eléctricos donde el comportamiento dinámico del motor eléctrico en conjunto con los sistemas de propulsión y distintos aspectos hidrodinámicos de la embarcación son modelados usando elementos "*Hardware-In-the-Loop*" (HIL) (Dufour et al., 2018; Nounou et al., 2018). De manera similar, se han desarrollado sistemas a escala para emular los efectos de los sistemas de propulsión eléctricos sobre la red eléctrica de embarcaciones, bajo diferentes condiciones de operación (Dallas et al., 2018).

Una limitación que presenta este tipo de emuladores a escala es que no ofrecen la capacidad de medir o modelar la emisión de GEI en un sistema de propulsión de tipo híbrido ni la eficiencia en el uso de combustible, ya que se centran en el modelado del accionamiento eléctrico y sus interacciones con el resto de la red en la embarcación. Es común, por ejemplo, que el sistema diésel-generador se modele mediante una fuente de tensión DC programable (Camara et al., 2016), lo que deja fuera las dinámicas del motor diésel. A esto se suma la tradicional reticencia al cambio de parte de la industria naviera y marítima a modelos que sean validados exclusivamente por medios computacionales, por lo que una planta híbrida a escala se plantea como una solución más aceptable a proyectos de reconversión.

El uso de plantas híbridas a escala para investigación y desarrollo de nuevas tecnologías de propulsión se encuentra reportado en la literatura. Tal es el caso del laboratorio de sistemas híbridos de potencia (HPS) en la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología (NTNU), que permite evaluar configuraciones y estrategias de control para la transición de sistemas de propulsión mecánicos convencionales a híbridos y completamente eléctricos (Othman et al., 2019). Sin embargo, no se ha encontrado referencias al uso sistemático de instalaciones de este tipo para generar evaluaciones y planes de reconversión de embarcaciones existentes a sistemas de propulsión híbridos.

3.4 Normativas vigentes

La normativa nacional aplicada a este tipo de propuestas ha logrado fundir normativa proveniente del Ministerio de Energía en la forma de una Estrategia Nacional de Electromovilidad (Ministerio de Energía, 2022b) que impulsa el recambio a vehículos eléctricos presentando al sector marítimo con un 20% de influencia en cuanto a cantidades de carga transportada y de emisiones respecto a los totales nacionales. La Estrategia Nacional de Electromovilidad promueve ejes estratégicos de cómo poder lograr la electromovilidad considerando regulaciones y estándares, transporte público, fomento de la investigación y desarrollo de capital humano, impulso inicial al desarrollo de la electromovilidad y a la transferencia de conocimiento y entrega de información. Dichos ejes han sido abordados y forman parte medular de esta revisión ya que un 20% de influencia a nivel nacional no es menor y debe ser abordado. De la misma forma, el Gobierno de Chile adquirió y ratificó acuerdos internacionales para reducir las emisiones de GEI en un 30% al 2030 y esto sería

J. Pérez Osses, V. Palma, M. Pérez, C. Reusser, C. Troncoso, H. Young

posible de lograr mediante la disminución del consumo de combustibles fósiles por parte de la industria naviera y marítima (Ministerio de Energía, 2022b).

Otras alternativas contemplan, para los motores CI, la utilización de combustibles alternativos como el amoníaco, metanol e hidrógeno. Este último ha sido considerado como el energético para producir e-amoníaco y e-metanol ya que su uso directamente en sistemas propulsivos con motores de CI recién se ha comenzado a aplicar (Anglo Belgian Corporation, 2020). Para el caso del metanol, sí existen motores de CI que los usan (MAN Diesel & Turbo, 2012, 2014, 2020), para el amoníaco, los motores CI se están desarrollando y debieran estar comercialmente disponibles para el 2023 (MAN Diesel & Turbo, 2021). Por otro lado, cabe mencionar que la Organización Marítima Internacional (OMI) considera a estos combustibles como alternativas viables de descarbonización del transporte marítimo (IMO, 2022a, 2022b).

La normativa internacional proveniente de la OMI permite identificar dos herramientas que permiten evaluar la eficiencia de nuevas y existentes embarcaciones en términos de CO₂ generado. Estas herramientas son el *Energy Efficiency Design Index* (EEDI) y el *Carbon Intensity Indicator* (CII). Ambas son obligatorias, la primera es usada para cuantificar las emisiones que una embarcación nueva debiera generar y la segunda es usada cuando la embarcación está en servicio evaluando la eficiencia de su operación (MEPC, 2009, 2012a, 2012b, 2012c). Entre los CII existe un indicador denominado *Energy Efficiency Operational Indicator* (EEOI), el cual considera factores como el consumo y el contenido de carbono del combustible, permitiendo una evaluación de las emisiones de GEI y contaminantes respecto al trabajo que realiza. Esto permite una evaluación inmediata del impacto de una embarcación y que se puede extrapolar a otras y a largo plazo. Usar combustibles alternativos como los mencionados permite una evaluación del abatimiento que el transporte marítimo puede aportar a la descarbonización fijada en los planes energéticos y medioambientales.

Esta revisión considera estas herramientas y las adapta como parte de una vinculación con normativa internacional dado que el Gobierno de Chile está obligado a seguirlas y aplicarlas al ser parte de la ONU. La eficiencia de las plantas de propulsión híbrida se podría evaluar con estas herramientas lo que permitiría una correlación y un compromiso global con la descarbonización.

4. CONCLUSIONES

Las plantas de propulsión híbridas son una de las mejores opciones tecnológicas para lograr el cambio hacia sistemas más eficientes y con menor dependencia de combustibles fósiles. Sin embargo, no existe actualmente una manera sistemática y confiable de evaluar potenciales ventajas de la transición a sistemas híbridos para diferentes clases de embarcaciones. Esto proyecta incertidumbre sobre la industria naviera y dificulta la toma de decisiones que justifiquen inversiones en este ámbito.

Se detectó que, dadas las características de la flota naviera nacional, existe actualmente una real oportunidad de desarrollo para el recambio a sistemas de propulsión híbridos, en particular para embarcaciones de apoyo a la industria acuícola y remolcadores de puerto. Pese a que actualmente no existen proveedores nacionales de tecnología para electromovilidad marítima, se identifica una

Oportunidades y desafíos en la transición hacia la electromovilidad marítima en Chile

oportunidad de desarrollo para plantas de potencia menor a 1.500 kW, dado que es un segmento no abordado aún por grandes proveedores internacionales.

A partir de esta revisión se concluye que una herramienta clave para fomentar la adopción de la electromovilidad marítima es el desarrollo de sistemas de evaluación sistemática basados en plantas experimentales a escala piloto, que hagan posible cuantificar ventajas tales como mejora en eficiencia de combustible, reducción de emisiones de GEI, reducción de costos a largo plazo en operación y de mantenimiento de los sistemas propulsivos.

AGRADECIMIENTOS Los autores agradecen el apoyo de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo ANID a través del Proyecto FONDEF IT20I0017. De la misma forma se agradece al Ministerio de Energía por la información facilitada para el desarrollo de este trabajo junto con las empresas Salmo & Boat y Ultratug Limitada por la información de las embarcaciones analizadas y presentadas como referencia.

REFERENCIAS

ABB (2016). Energy Efficiency Guide - The Other Alternative Fuel. Recuperado el 08 julio 2022 de <https://library.abb.com> https://library.e.abb.com/public/ce940f43aa732297c1257b860031260f/ABB_Marine_Energy_Efficiency_Guide_04062013.pdf

Alwoplast S.A. (2020). Astillero. Recuperado el 08 julio 2022 de <https://www.alwoplast.cl/>

Anglo Belgian Corporation (2020). We Power Your Future. Recuperado el 08 julio 2022 de <https://www.abc-engines.com/>

Apsley, J. M., Todd, R., Barnes, M., Schuddebeurs, J., y Careme, S. (2008). Experimental validation of load disturbances on a multiphase marine propulsion drive model. Paper presented at the 2008 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives, York, UK.

ASENAV (2020). Astilleros y Servicios Navales. Recuperado el 08 julio 2022 de <http://asnav.cl.previewc75.carrierzone.com/es/home/>

Begovic, E., Bertorello, C., De Luca, F., y Rinauro, B. (2022). KISS (Keep It Sustainable and Smart): A research and development program for a zero-emission small craft. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(1), 16. Recuperado el 08 julio 2022 de <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/1/16>

Camara, M. B., Payman, A., y Dakyo, B. (2016). Energy management based on frequency approach in an electrical hybrid boat. Paper presented at the 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Toulouse, France.

Clarksons Research (2022). Clarksons World Fleet Register. Recuperado el 08 julio 2022 de www.clarksons.net/wfr/

J. Pérez Osses, V. Palma, M. Pérez, C. Reusser, C. Troncoso, H. Young

Corporación de Fomento de la Producción [CORFO] (2022). Corporación de Fomento de la Producción del Gobierno de Chile. Recuperado el 08 julio 2022 de <https://www.corfo.cl/sites/cpp/home>

Dallas, S. E., Pytharoulis, M., y Prousalidis, J. M. (2018). Investigation of the behavior of a marine grid emulator during power disturbances. Paper presented at the 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, Greece.

Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante [DIRECTEMAR] (2020). Boletín Estadístico Marítimo. Recuperado el 08 julio 2022 de <https://www.directemar.cl/directemar/site/edic/base/port/boletines.html>

Dufour, C., Soghomonian, Z., y Li, W. (2018). Hardware-in-the-loop testing of modern on-board power systems using digital twins. Paper presented at the International Symposium on Power Electronics, Electric Drives, Automation and Motion.

European Environment Agency (2013). The Impact of International Shipping on European Air Quality and Climate Forcing. Recuperado el 08 julio 2022 de <https://www.eea.europa.eu/publications/the-impact-of-international-shipping>

Gobierno de Chile (2022). Plan de Acción de Eficiencia Energética 2020. Recuperado el 08 julio 2022 de <https://energia.gob.cl>

Griffiths, D. (1999). Marine Medium Speed Diesel Engines. London: Institute of Marine Engineers.

Gupta, A., Saini, R. P., y Sharma, M. P. (2009). Steady-state modelling of hybrid energy systems. Paper presented at the Third International Conference on Electrical Engineering, Lahore, Pakistan.

IMO (2018). Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, Resolution MEPC.304(72) C.F.R. (2022a). Recuperado el 08 julio 2022 de <https://www.imo.org>

IMO (2009). Circ.684 - Guidelines for Voluntary Use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI). Recuperado el 08 julio 2022 de <https://www.imorules.com/GUID-7DEA8EBF-32B8-4EDE-B674-A61B22B16AC3.html>

IMO (2022c). Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020. Recuperado el 08 julio 2022 de <https://www.imo.org>

IMO (2022d). International Maritime Organisation. Recuperado el 08 julio 2022 de www.imo.org
International Energy Agency [IEA] (2022). IEA HEV Task 38 on e-Ships. Recuperado el 08 julio 2022 de <http://www.ieahev.org/tasks/task-38-marine-applications/>

IRCLASS (2019). Guidelines for Consistent Implementation of the 0.50% Sulphur Limit Under MARPOL Annex VI, MEPC.320(74) C.F.R. (2022b). Recuperado el 08 julio 2022 de <https://www.irclass.org/>

Oportunidades y desafíos en la transición hacia la electromovilidad marítima en Chile

Kim, S., y Jeon, H. (2022). Comparative analysis on AC and DC distribution systems for electric propulsion ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 559. Recuperado el 08 julio 2022 de <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/5/559>

Kowalski, J., Lesniewski, W., y Litwin, W. (2013). Multi-source-supplied parallel hybrid propulsion of the inland passenger ship STA.H. research work on energy efficiency of a hybrid propulsion system operating in the electric motor drive mode. *Polish Maritime Research*, 20(3), 8.

Kumar, B. A., Selvaraj, R., Chelliah, T. R., y Ramesh, U. S. (2019). Improved fuel-use efficiency in diesel–electric tugboats with an asynchronous power generating unit. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5(2), 565-578.

Lloyd's Register y UMAS (2022). Zero-Emission Vessels 2030 - How Do We Get There? Recuperado el 08 julio 2022 de <https://www.lr.org>

MAN Diesel y Turbo (2012). ME-GI Dual Fuel MAN B & W Engines A Technical, Operational and Cost-effective Solution for Ships Fuelled by Gas. Recuperado el 08 julio 2022 de www.mandieselturbo.com

MAN Diesel y Turbo (2013). Emission Control Two-Stroke Low-Speed Diesel Engines. Recuperado el 08 julio 2022 de www.mandieselturbo.com

MAN Diesel y Turbo (2014). Operation on Low-Sulphur Fuels MAN B & W Two-Stroke Engines. Recuperado el 08 julio 2022 de www.mandieselturbo.com

MAN Diesel y Turbo (2020). Retrofit & Upgrade. Recuperado el 08 julio 2022 de www.mandieselturbo.com

MAN Diesel y Turbo (2021). MAN Diesel & Turbo Engine Builder. Ammonia. Recuperado el 08 julio 2022 de www.mandieselturbo.com

McCoy, T. J., y Amy Jr., J. V. (2009). The state-of-the-art of integrated electric power and propulsion systems and technologies on ships. Paper presented at the Electric Ship Technologies Symposium, Baltimore, Maryland, USA.

McKinlay, C. J., Turnock, S. R., y Hudson, D. A. (2021). Route to zero emission shipping: Hydrogen, ammonia or methanol? *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(55), 28282-28297.

MEPC.212(63) (2012a). Annex 8 - 2012 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained EEDI for New Ships.

MEPC.213(63) (2012b). Annex 9 - Guidelines for the Development of a SEEMP.

J. Pérez Osses, V. Palma, M. Pérez, C. Reusser, C. Troncoso, H. Young

MEPC.215(63) (2012c). Annex 11 - Guidelines for Calculation of Reference Lines for Use With the EEDI.

MEPC.308(73) (2018). Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships, C.F.R.

Ministerio de Energía (2022a). Energía 2050 - Política Energética de Chile. Recuperado el 08 julio 2022 de <https://energia.gob.cl>

Ministerio de Energía (2022b). Estrategia Nacional de Electromovilidad - Un Camino para los Vehículos Eléctricos. Recuperado el 08 julio 2022 de <https://energia.gob.cl>

Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (2022). Observatorio Logístico. Recuperado el 08 julio 2022 de <https://www.observatoriologistico.cl/perfiles/transporte-maritimo-de-carga/>

Ministerio del Medio Ambiente (2022). Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017 - 2022. Recuperado el 08 julio 2022 de <https://mma.gob.cl>

Nguyen, H. P., Hoang, A. T., Nizetic, S., Nguyen, X. P., Le, A. T., Luong, C. N. y Pham, V. V. (2021). The electric propulsion system as a green solution for management strategy of CO2 emission in ocean shipping: A comprehensive review. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(11), e12580.

Nounou, K., Charpentier, J. F., Marouani, K., Benbouzid, M., y Kheloui, A. (2018). Emulation of an electric naval propulsion system based on a multiphase machine under healthy and faulty operating conditions. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(8), 6895-6905.

Othman, M. B., Reddy, N. P., Ghimire, P., Zadeh, M. K., Anvari-Moghaddam, A., y Guerrero, J. M. (2019). A hybrid power system laboratory: testing electric and hybrid propulsion. *IEEE Electrification Magazine*, 7(4), 89-97.

Rolls Royce (2022). Marine Rolls Royce. Recuperado el 08 julio 2022 de <https://www.rolls-royce.com/products-and-services/marine.aspx>

Sociedad de Fomento Fabril [SOFOFA] (2022). Indicadores. Recuperado el 08 julio 2022 de <https://www.sofofa.cl/indicadores/indice-de-produccion-y-ventas-manufactureras/>

WÄRTSILÄ (2022). Wärtsilä Engine Builder. Recuperado el 08 julio 2022 de www.wartsila.com

Wik, C. (2010). Reducing medium-speed engine emissions. *Journal of Marine Engineering and Technology*, A17, 8.

Woud, H. K., y Stapersma, D. (2002). *Design of Propulsion and Electric Power Generation Systems*. London: London: IMarEST, Institute of Marine Engineering, Science and Technology.

Oportunidades y desafíos en la transición hacia la electromovilidad marítima en Chile

Zhai, H., Frey, H. C., y Roupail, N. M. (2007). Methodology for development of a modal fuel use and emissions rate model for a hybrid electric vehicle. En N. S. University (Ed.), 16th Annual International Emission Inventory Conference Emission Inventories: “Integration, Analysis, and Communications”.