

PROPUESTA PARA DISMINUIR LA HUELLA DE CARBONO MEDIANTE EL USO DE H2V EN REMOLCADORES DE ALTA MAR EN PUERTOS

Luciano Núñez, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería de Construcción y Transporte luciano.nunez.c@mail.pucv.cl
María Isabel Vega, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería de Construcción y Transporte maria.vega.c@pucv.cl
Lorena Bearzotti, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Ingeniería de Construcción y Transporte, lorena.bearzotti@pucv.cl

RESUMEN

Dada la importancia del transporte en las diferentes actividades de la sociedad y su alta participación en las emisiones contaminantes producto de los motores de combustión interna a base de combustibles fósiles, es que surge la necesidad de una transición a una matriz energética de fuentes renovables, donde el hidrógeno verde surge como una opción con el fin de reducir el impacto.

A través de este análisis se busca reducir de manera progresiva las emisiones en el transporte marítimo. Se espera que el uso de biocombustibles a base de H2V permita iniciar una serie de pruebas para futuras propuestas que promuevan un cambio hacia una matriz energética renovable, con el objetivo de reducir la huella de carbono en los remolcadores de alta mar.

Palabras claves: Sustentabilidad en operaciones portuarias, Hidrógeno verde, remolcadores

ABSTRACT

Given the importance of transport in the different activities of society and its high participation in polluting emissions as a result of internal combustion engines based on fossil fuels, the need arises for a transition to an energy matrix of renewable sources, where green hydrogen emerges as an option in order to reduce the impact.

Through this analysis, the aim is to progressively reduce emissions in maritime transportation. It is expected that the use of H2V-based biofuels will enable the initiation of a series of tests for future proposals that promote a transition towards a renewable energy matrix, with the goal of reducing the carbon footprint in high-sea tugboats.

Keywords: Sustainability in port operations, Green hydrogen, tugboats

1. INTRODUCCIÓN

Si bien la tecnología y los avances de la sociedad a lo largo de los siglos han traído bastante practicidad y facilidad a la humanidad, también, repercute de manera negativa al cambio climático (Sánchez, 2019). Actualmente el hombre está frente al peor escenario posible; el calentamiento global, donde el ser humano ha sido el principal causante con la quema de combustibles fósiles, esta combustión genera gases y partículas que contaminan y afectan negativamente al mundo.

Cuando los combustibles fósiles se queman, producen una serie de gases de efecto invernadero (GEI) que al liberarse quedan retenidos en la atmósfera y son capaces de absorber la radiación infrarroja de los rayos del sol.

La emanación de contaminantes atmosféricos a nivel mundial proviene en gran medida del sector de transporte por lo que diversos organismos buscan cuantificar y reducir año tras año las emisiones. El cambio climático es una realidad y la preocupación de este ha ido en aumento por la dificultad de lograr los objetivos de la reducción, por lo que en los últimos años se han ido implementando nuevas normativas en los diversos modos de transporte, como lo son; el modo aéreo, modo marítimo, modo carretero y modo ferroviario.

Lo anterior, alude a la necesidad de disminuir la emisión de GEI de manera urgente. Específicamente en el sector de transporte marítimo existen convenios como marine pollution (MARPOL) que buscan mitigar la contaminación de ecosistemas marino, creando normativas cada vez más estrictas para las embarcaciones, pero no de todas las embarcaciones, las naves de gran envergadura se encuentran bajo una presión acelerada para descarbonizar, pero las embarcaciones más pequeñas no se encuentran sometidas a presiones mundiales si no que presentan una nula presión global y sólo en unas pocas zonas portuarias se está comenzando a regular a las embarcaciones pequeñas.

1.1 Antecedentes del problema

La presencia de los GEI contribuye principalmente al calentamiento global, acelerando el cambio climático por el aumento de temperaturas en la atmósfera, llevando al planeta a un punto de no retorno del efecto invernadero.

Los gases de efecto invernadero no son un problema en sí ya que, si no existiera la emisión de los GEI producto de los humanos sería un fenómeno natural que permite mantener las condiciones esenciales para la vida dentro del planeta, pero como se tienen diversas actividades de distintos rubros económicos existe año a año un incremento de emisiones proporcional al consumo de bienes y servicios de la población. Las principales fuentes contaminantes son las industrias y el transporte, que funcionan con motorizaciones tradicionales de combustión interna a base de combustibles fósiles.

Por lo anterior, el mundo requiere de una rápida transición energética a energías renovables, limpias y sostenibles que al momento de su obtención y posterior uso genere una reducción o completa mitigación de GEI producidos por el factor humano.

Es así como se debe utilizar el elemento más abundante del planeta, el Hidrógeno. El hidrógeno obtenido mediante la electrólisis y obtenido de fuentes renovables puede tomar un rol protagónico por su alta capacidad energética y por su capacidad de reducir los gases de efecto invernadero a 0 en diversos sectores de la economía, inclusive en los más difíciles de mitigar.

Específicamente en uno de los sectores más contaminantes, el sector del transporte puede jugar un rol clave, ya que puede ser utilizado como un combustible sostenible en todos los medios y modos de transporte.

En transporte marítimo, los diversos actores buscan reducir su huella de carbono de manera progresiva para lograr reducciones en sus emisiones contaminantes y uno de estos actores, que necesita cuidar y reducir progresivamente su huella de carbono son los remolcadores de alta mar (RAMS), actores fundamentales en atención a las naves comerciales que carecen de normativas estrictas para la descarbonizar el rubro.

1.2 Situación problema

Los remolcadores son embarcaciones esenciales para las maniobras de las naves en puerto, su apoyo permite junto al práctico garantizar la seguridad en las faenas, previniendo cualquier tipo de accidentes entre embarcaciones o entre la nave y estructuras portuarias y para la realización de toda maniobra, los remolcadores deben contar con la correspondiente maniobrabilidad, estabilidad, potencia y/o bollard pull (toneladas de tiro) que les permita traccionar al buque eficazmente, además de contrarrestar la fuerza del viento, del oleaje o de las corrientes. Por consiguiente, requieren de elevadas potencias que van desde los 2000 CV hasta los 8000 CV, estas potencias generalmente son obtenidas de un par de motores gemelos turbo diésel que aportan emisiones significativas al medio ambiente.

De lo anterior nace la pregunta ¿Cómo se pueden reducir las emisiones de los remolcadores?

1.3 Justificación del problema

Actualmente existe más de 21.000 unidades en el mundo que en conjunto aportan 40 millones de toneladas de CO_2 al planeta, esto representa el 4% de emisiones del transporte marítimo, que parecen pequeñas, pero, el problema radica en que el servicio de remolcadores no es considerado por muchos en la cadena de suministros y al igual que el resto de las embarcaciones requiere de una descarbonización del rubro, al cual, no le han dado el peso que significan sus gases contaminantes. (Jameson, 2022)

Los RAMS pueden haberse convertido en la principal fuente de contaminantes de CO_2 en los puertos, con un impacto elevado en la calidad del aire y principalmente se debe a que los remolcadores emiten la mayor cantidad de hollín por kilogramo de combustible quemado de todas las embarcaciones, que es de casi un gramo de hollín por kilogramo de diésel quemado y se debe principalmente a la baja calidad del combustible que utilizan para operar y al gran desgaste de sus motores a lo largo de su vida útil que sobrepasa los 30 años. (Lack, 2008)

Esto repercute negativamente al aire de los centros poblacionales ya que este tipo de embarcaciones operan muy cercanas a las costas y de las personas, si el panorama no cambia el ecosistema tendrá impactos negativos a mediano plazo por la emisión de gases y partículas contaminantes como; incrementos de temperatura, mala calidad del aire, problemas de salud de la población, fenómenos naturales extremos, extinción de especies de la flora y fauna. Por el otro lado, si se toman medidas para reducir las emisiones, temas como el impacto al medio ambiente chileno a un largo plazo podría ya no ser un problema, la calidad del aire podría ser más limpia de CO_2 , aportaría a la tendencia sostenible que se quiere llegar y Chile podría ser un ejemplo en temas de sostenibilidad en zonas portuarias.

2.MARCO TEÓRICO

2.1 Transporte marítimo

El transporte por la vía marítima es el modo de transporte más utilizado para el comercio internacional, ya que, es el responsable del mayor movimiento de mercancías tanto de cargas unitarizadas como cargas de granel, lo que lo convierte en el pilar de mayor envergadura del comercio mundial. Su movimiento de cargas representa el 90% de la movilización mundial (Wood T, 2023).

Para la realización del transporte marítimo, se deben contar con ciertas infraestructuras que permitan la transferencia de mercancías entre distintos medios de transporte, así es como los terminales juegan un papel crucial en la cadena de suministro global; al facilitar el movimiento de bienes desde su fuente de producción hasta los puntos de consumo. Los terminales portuarios tienen diversos actores que participan en las operaciones del lado tierra y del lado mar.

Sin embargo, el lado marítimo presta mucha atención al rendimiento de los terminales portuarios ya que la industria marítima busca optimizar los tiempos en que las embarcaciones se encuentran inmovilizadas, es decir los tiempos de arribada a un terminal, tiempos de atraque, descarga, carga y desatraque. Sin embargo, estos tiempos dependen en gran medida al servicio que prestan unas pequeñas embarcaciones llamadas tugboat o tug en inglés (remolcadores). Los remolcadores son embarcaciones esenciales para las maniobras de las naves en puerto, su apoyo permite junto al práctico garantizar la seguridad en las faenas, previniendo cualquier tipo de accidentes entre embarcaciones o entre la nave y estructuras portuarias.

Para la realización de toda maniobra los remolcadores deben contar con la correspondiente, maniobrabilidad, estabilidad y bollard pull (BP) que les permita traccionar al buque eficazmente, además de contrarrestar la masa de inercia de la embarcación, la fuerza del viento, del oleaje o de las corrientes.

Por consiguiente, cada puerto dentro de todas sus resoluciones de operación, consideran restricciones para el uso de remolcadores, definiendo tipo de hélices, BP mínimo por cada remolcador y cantidad de RAMs por faena dependiendo de las características de la embarcación a que se le prestará el servicio, calado máximo, intensidad del oleaje, olas, vientos, corrientes entre algunos factores determinantes (Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante,

Sf). Si bien las regulaciones marítimas locales de puertos marítimos nacionales se encargan de definir las capacidades técnicas de las embarcaciones por ningún lado en ellas se habla de un límite en la vida útil de un RAM, ni mucho menos de límites en la emisión de gases contaminantes.

2.2 Huella de carbono

Indicador ambiental que se utiliza para contabilizar y estimar la cantidad total de gases de efecto invernadero que una actividad o proceso tiene sobre el cambio climático. La huella de carbono puede ser abordada dependiendo del enfoque específico que se le quiere dar y se expresa como Dióxido de carbono (CO₂) equivalente y puede ser emitido directa o indirectamente por una actividad, proceso, producto, organización o región geográfica.

La industria del transporte marítimo aporta alrededor del 3% (940 mT de CO₂) de las emisiones mundiales de CO₂ y para hacer una comparativa este porcentaje equivale a la huella de carbono del sexto país más grande (Jameson P, 2023).

2.3 Combustibles utilizados en transporte marítimo

Se sabe que los motores del transporte marítimo utilizan fuel oil de baja calidad para reducir los costes operativos de los barcos, ya que el coste del combustible representa entre un 30% a un 50 % de los costes operativos totales del transporte marítimo (Anish, 2020), y para tener una exitosa navegación, las embarcaciones deben contar con un apropiado combustible que garantice el correcto funcionamiento del motor, de esta forma, se utilizan principalmente 4 tipos de combustibles: Heavy Fuel Oil (HFO), Low Sulfur Fuel Oil (LSFO), Marine Diesel Oil (MDO) y Marine Gas Oil (MGO).

El diésel oil marítimo es un tipo de combustible que a diferencia del diésel que utilizan los vehículos terrestres no es un destilado puro, es similar, pero tiene una mayor densidad. Este combustible en ocasiones también se usa como sinónimo del término "combustible intermedio"(IFO). El concepto del MDO se refiere a que es una mezcla con una proporción muy pequeña de HFO por lo que el diésel marítimo en algunos libros es clasificado como un combustible destilado. Mientras que el concepto del IFO es una mezcla que utiliza un mayor grado el HFO. el MDO es un tipo de fuel oil menos contaminante que el HFO y el LSFO al no ser un combustible residual. (Oiltanking, Sf). Este tipo de combustible es ampliamente utilizado por motores diésel marinos de velocidad media y media/alta como embarcaciones medianas como ferries, remolcadores, barcos de pesca, yates entre algunos (Eng, 2020).

2.4 Contaminación producida del transporte marítimo

Las principales emisiones del transporte marítimo provienen de la quema de hidrocarburos, es decir de los combustibles que alimentan a las motorizaciones (Collins, 2022). Los gases producidos por los combustibles utilizados en el rubro son:

- Dióxido de carbono (CO₂): Vapor incoloro que es el principal gas de efecto invernadero emitido por la quema de combustibles fósiles. El CO₂ se produce como resultado de la combustión de combustibles fósiles, como el petróleo, carbón y el gas natural, utilizados para propulsar a los vehículos de los diversos medios de transporte.
- Óxidos de nitrógeno (NO_x): Grupo de compuestos químicos formados por la combinación de átomos de nitrógeno y oxígeno, se generan por la combustión de los combustibles a altas temperaturas al interior de los cilindros del motor de los barcos y contribuyen a la formación de smog y la lluvia ácida.
- Dióxido de azufre (SO₂): Es un gas incoloro con un característico olor irritante, se produce cuando el combustible que utiliza el barco contiene azufre. El SO₂ contribuye a la lluvia ácida y puede tener efectos negativos en la salud humana y en el medio ambiente.
- Monóxido de carbono: (CO) Gas incoloro e inodoro que se produce por la combustión incompleta de materiales orgánicos.
- Compuestos orgánicos volátiles distintos del metano (COVDM): grupo de compuestos químicos orgánicos que tienen una alta presión de vapor a temperatura ambiente y que pueden evaporarse fácilmente en el aire. Los COVDM son emitidos por fuentes naturales y antropogénicas, incluyendo la combustión de combustibles fósiles.
- Material particulado (PM): mezcla de partículas líquidas y sólidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas, que se encuentran en suspensión en el aire. Se emiten en forma de hollín y otros materiales durante la combustión de combustibles fósiles. Las partículas pueden ser inhaladas y pueden tener efectos negativos en la salud humana.

2.5 Sustentabilidad

La Organización Marítima Internacional (OMI) en el 2018 acordó un plan borrador de estrategia de gases de efecto invernadero para el transporte marítimo que requiere que el sector del transporte marítimo reduzca sus emisiones en al menos un 50 % para 2050 comparado con los niveles de emisiones del 2008 (International Maritime Organization, 2018).

Estas medidas son de carácter obligatorio para abordar la reducción de las emisiones de GEI de las embarcaciones. Una medida que destaca es reducir la intensidad de carbono de todos los buques en un 40% para 2030, en comparación con 2008 (anexo VI del MARPOL), esto ha obligado a que los *owners* deban calcular su índice de eficiencia energética del buque y establezcan su indicador de la intensidad de carbono (MundoMarítimo, 2021) que es un valor que representa las emisiones de CO₂ por unidad de transporte, como la emisión de CO₂ por tonelada de carga transportada por milla náutica.

En las embarcaciones pequeñas y en específico en el servicio de remolcadores de alta mar poseen una mínima presión para descarbonizarse y la presión existente es local y no mundial, pero algún momento la presión y regulación al servicio de remolque se dará tarde o temprano y al igual que al

resto del transporte marítimo, vela por reducir los niveles de intensidad de carbono (Jameson P. J., 2022).

2.6 Cambio en la matriz energética

Las motorizaciones de combustión interna (MCI) a combustibles destilados y a combustibles residuales predominan en el mundo por su fiabilidad y versatilidad en los diversos medios de transporte. Esta motorización requiere de una nueva evolución para utilizar biocombustibles que no generen una huella de carbono.

La adopción de nuevas tecnologías y el uso de biocombustibles pueden ayudar a reducir las emisiones de dióxido de carbono y otros contaminantes en el transporte marítimo. Los principales avances van relacionados con la matriz energética; algunos fabricantes optan por el reemplazo de las motorizaciones, otros por adaptaciones que hagan más eficiente a la matriz y otros optan al uso de biocombustibles e hibridaciones en base de diésel con nuevos combustibles nunca vistos en la industria (Jameson P. J., 2022).

El sector de remolque está experimentando transiciones a energías limpias incipientes, pero con bastante potencial. A pesar de la baja presión de descarbonización han existido grandes avances de unidades, principalmente de recursos completamente eléctricos e híbridos que ya son comercializados. Mientras que los prototipos que utilizan combustibles alternativos están en etapas de desarrollo y pruebas, que no quedan exentos de atención e inversión.

Existen diversas tecnologías que planean utilizar como combustible el hidrógeno verde, el amoníaco y el metanol. Su utilización puede alimentar a motorizaciones de combustión interna y motorizaciones eléctricas. (Jameson P. J., 2022)

A continuación, se muestra la figura 2.4 sobre las ventajas y desventajas de cada sistema de propulsión sustentable en RAM. Estas tecnologías son consideradas por parte de armadores, navieras, y empresas que brindan servicios de remolque.

El sector de remolque está experimentando transiciones a energías limpias incipientes, pero con bastante potencial. A pesar de la baja presión de descarbonización han existido grandes avances de unidades, principalmente de recursos completamente eléctricos e híbridos que ya son comercializados. Mientras que los prototipos que utilizan combustibles alternativos están en etapas de desarrollo y pruebas, que no quedan exentos de atención e inversión.

Existen diversas tecnologías que planean utilizar como combustible el hidrógeno verde, el amoníaco y el metanol. Su utilización puede alimentar a motorizaciones de combustión interna y motorizaciones eléctricas. (Jameson P. J., 2022)

A continuación, se muestra la figura 1 sobre las ventajas y desventajas de cada sistema de propulsión sustentable en RAM. Estas tecnologías son consideradas por parte de armadores, navieras, y empresas que brindan servicios de remolque.

Tug market is focused on four main propulsion technologies in order to achieve decarbonization

	 Electricity	 E-/bio- Methanol	 Ammonia	 Hydrogen
Propulsion system	Electric motor	Combustion engine	Combustion engine	Fuel cell & electric motor or combustion engine
Energy efficiency	High	Low	Low	Medium
Compatibility with existing vessels	Low (hard to retrofit)	Relatively high (can be blended due to similar properties to gasoline; retrofit for 100% MeOH to existing vessels possible but costly)	Medium (Retrofit to existing vessels possible but costly)	Low (hard to retrofit)
Technology maturity	High (several vessels operational)	High (several vessels operational)	Low (first models in development)	Medium (first pilots)
Range	Medium (onboard energy storage limited due to battery size)	High	High	High
Refueling time	High	Low	Low	Low
Other concerns		Contains carbon atoms, requiring costly direct air capture for carbon neutrality	Toxicity and NO _x emission concerns	H ₂ storage & distribution difficult

Source: Getting to Zero Coalition "Report on Climate Commitments by Signatories to the Call to Action for Shipping Decarbonization" (Third Edition December 2021); Clarkson Research Services; BCG analysis

● Mixed ● Favorable ● Unfavorable

Figura 1: Tecnologías para descarbonizar la industria RAM
Fuente: LinkedIn

3. LOS PUERTOS NACIONALES Y SUS CAMBIOS EN LA MATRIZ ENERGÉTICA

Para el estado de Chile, el mar y las actividades relacionadas a él, tienen gran relevancia para su comercio exterior, su ubicación y su extensa longitud colinda con el océano pacífico que le da una gran ventaja estratégica para su crecimiento económico, ya que su extensión permite una conectividad para el transporte marítimo de cargas con mercados estratégicos como el asiático, europeo y el americano. Su crecimiento está relacionado directamente al comercio internacional de bienes, las exportaciones de productos como de productos naturales, agrícolas, químicos y materias primas, al igual que las importaciones de productos como productos electrónicos, tecnológicos, farmacéuticos, combustibles, maquinarias, equipos y vehículos, representan que el “94,9% de nuestro comercio exterior, se moviliza por vía marítima” (Dirección general del territorio marítimo y de marina mercante, 2017).

La autoridad marítima nacional, a través del departamento de tecnologías marítimas, presenta de manera anual la información recopilada de la industria marítima chilena, es así, como la DIRECTEMAR realiza año tras año, un análisis del número de embarcaciones que arriban a los puertos nacionales, considerando el tipo de servicio portuario que recibe al momento de su llegada a puerto, ya sea atraque o amarre de boyas. También se considera a que puerto arriba y en qué mes llegó. En la tabla se visibiliza el número de naves recaladas por mes y por puerto en el año 2020. Esta información proviene del documento nombrado “Análisis estadísticas Portuarias Edición 2021” publicado por la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante.

Tabla 1: Número de naves recaladas por mes y puerto

AUTORIDAD MARÍTIMA	ENE		FEB		MAR		ABR		MAY		JUN		JUL		AGO		SEP		OCT		NOV		DIC		TOTAL		TOTAL
	ATR	ABY	ATR	ABY	ATR	ABY	ATR	ABY	ATR	ABY	ATR	ABY	ATR	ABY	ATR	ABY	ATR	ABY	ATR	ABY	ATR	ABY	ATR	ABY	ATR	ABY	
Arica	28	2	30	1	23	2	24	-	23	1	20	1	19	2	23	2	20	2	20	4	26	2	22	4	278	23	301
Iquique	35	7	35	5	29	7	33	3	29	7	22	7	21	6	18	5	26	5	31	6	28	7	29	6	336	71	407
Patache	-	33	-	22	-	17	-	17	-	25	-	13	-	24	-	19	-	19	-	13	-	23	-	23	-	248	248
Tocopilla	1	2	3	5	-	6	-	8	2	3	1	3	1	8	1	6	1	6	-	9	1	6	-	4	11	66	77
Mejillones	69	5	78	3	80	3	64	2	83	5	74	3	85	4	73	3	73	4	80	4	90	4	60	3	909	43	952
Antofagasta	20	12	21	12	17	10	25	10	20	9	14	8	17	9	17	9	4	8	10	7	20	6	21	6	206	106	312
Chañaral	6	1	3	1	7	2	5	1	5	1	3	2	3	2	4	1	3	2	4	1	4	1	3	1	50	16	66
Caldera	8	5	9	7	10	5	9	5	8	6	11	4	9	5	7	6	8	6	8	6	8	8	15	5	110	68	178
Huasco	6	-	7	-	13	-	9	-	8	1	11	-	11	-	10	-	11	-	8	-	5	-	10	-	109	1	110
Coquimbo	18	4	17	6	12	4	8	5	8	3	9	2	8	4	6	5	8	3	5	5	7	3	7	6	113	50	163
Los Vilos	3	-	4	-	5	-	3	-	8	-	4	-	3	-	5	-	4	-	5	-	4	-	5	-	53	-	53
Hanga Roa	-	1	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	-	-	5	5
Quintero	24	46	34	52	29	42	30	34	42	37	29	26	49	29	32	28	36	26	34	33	29	33	25	25	393	411	804
Valparaíso	60	1	70	-	59	-	30	-	38	-	37	-	41	-	35	-	38	1	32	-	42	-	44	-	526	2	528
San Antonio	88	-	88	-	72	-	76	-	88	-	60	-	79	-	72	-	67	-	75	-	82	-	74	-	921	-	921
Lirquén	20	-	16	-	16	-	17	-	20	-	18	-	22	-	26	-	22	-	21	-	20	-	19	-	237	-	237
Talcahuano	10	-	7	-	6	-	2	-	4	-	1	-	7	-	1	-	12	-	6	-	5	-	3	-	64	-	64
San Vicente	50	-	49	-	47	-	41	-	46	-	39	-	42	-	37	-	39	-	47	-	40	-	53	-	530	-	530
Coronel	24	3	24	2	31	3	23	2	29	2	23	2	28	2	19	1	26	-	26	4	29	3	29	1	311	25	336
Corral	3	-	1	-	1	-	3	-	2	-	1	-	2	-	2	-	2	-	1	-	2	-	2	-	22	-	22
Valdivia	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
Calbuco	6	-	8	-	8	-	5	-	6	-	4	-	7	-	5	-	4	-	5	-	4	-	6	-	68	-	68
Puerto Montt	8	5	12	8	9	2	9	1	10	1	4	-	11	-	16	-	17	-	12	-	10	-	8	-	126	17	143
Quellón	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
Chacabuco	-	4	2	2	-	4	1	2	2	-	2	4	1	2	3	3	2	1	2	10	3	-	2	25	29	54	
Puerto Natales	1	6	9	-	5	-	-	-	21	-	21	-	2	-	-	-	-	4	-	3	-	4	-	70	6	76	
Punta Arenas	52	-	94	2	46	3	19	-	19	2	13	-	17	-	15	2	16	-	26	2	23	2	20	1	360	14	374
Puerto Williams	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	5
TOTAL	545	137	621	129	525	110	437	90	521	106	419	73	489	96	426	91	440	84	461	97	492	101	459	87	5.835	1.201	7.036

Fuente: Departamento Tecnológicas Marítimas de la DIRECTEMAR

3.1 Situación actual de la flota RAM de Valparaíso

Actualmente en el puerto de Valparaíso son tres las empresas que brindan el servicio de remolcadores. Existe una flota fija por parte de la empresa SAAM Towage que tiene dos recursos en todo momento del año y en este momento los recursos designados son el RAM “Mataquito II” y el RAM “Halcón III”, Por parte de la empresa Ultratug cuenta con dos unidades que, dependiendo de la demanda, las unidades se encuentran zarpando constantemente a la bahía de Quintero. En este momento estas unidades son RAM “Loncura” y el RAM “Horcón” y por parte de la empresa CPT Towage al igual que los recursos de Ultratug cuenta con un solo recurso que realiza este mismo zarpe y su remolcador que apoya en VAP es el “Poderoso I”

Cabe recalcar que la bahía de Quintero cuenta con un mayor movimiento de embarcaciones y un mayor número de terminales, frentes de atraque e incluyen amarras a boyas en su bahía por lo que, la demanda del servicio de remolque es superior a Puerto Valparaíso (VAP). Los recursos de Ultratug y CPT Towage están gran parte en la bahía de Quintero por la realización de las faenas de manera paralela, es decir, dos o más al mismo tiempo.

3.2 Emisiones RAM

Para la cuantificación de emisiones en el transcurso de un año, se determina que se trabaja con un remolcador base designado en este trabajo como “X”. Este RAM cuenta con todas las especificaciones determinadas por la Capitanía de puerto de Valparaíso y como antecedente operó años anteriores en puerto VAP, pero no se revelará su verdadero nombre ni modelo exacto y se supondrá que este remolcador aún opera en el puerto y es parte de la flota actual antes mencionada.

Los motores utilizados en el RAM “X” son motorizaciones de alta potencia fabricados por la marca Caterpillar. Cada uno de ellos puede generar una potencia aproximada de 2300 CV a unas bajas revoluciones de 2000 RPM. Además, ambos motores cuentan con una cilindrada de 78 litros cúbicos.

En la tabla adjunta a continuación, se muestra las emisiones obtenidas por el recurso “X” durante el transcurso de un año, el modelo RAM base opera con una motorización de combustión interna utilizando como combustible el destilado diésel marino y como gran parte de los remolcadores actuales, su matriz energética está compuesta por dos motores gemelos sobrealimentados anclados a hélices azimutales.

Tabla 2: Emisiones del RAM base “X”

RAM	Motorización	Fabricante motorización	Combustible	Enero (Kg CO2e)	Febrero (Kg CO2e)	Marzo (Kg CO2e)	Abril (Kg CO2e)	Mayo (Kg CO2e)	Junio (Kg CO2e)
"X"	MCI	Caterpillar	Diésel	71162,0	148697,1	87536,5	74907,1	98847,9	56219,7
Julio (Kg CO2e)	Agosto (Kg CO2e)	Septiembre (Kg CO2e)	Octubre (Kg CO2e)	Noviembre (Kg CO2e)	Diciembre (Kg CO2e)	Total (Kg CO2e)	Total (T CO2e)		
83517,0	78309,7	51893,0	120565,5	55904,5	52616,0	980176,01	0,980176		

3.3 Diagnóstico Emisiones RAM

En base a lo anterior, se tiene que la contaminación de un recurso RAM es de 0,980176 toneladas de CO2 equivalente a lo largo de un año operando en el puerto de Valparaíso. Por otro lado, para cuantificar las emisiones es necesario considerar que la cantidad de recursos que operan en el puerto de Valparaíso es de 5 unidades, pero no todos están de manera fija en el puerto. Por esta razón es necesario definir con qué frecuencia los remolcadores que realizan servicios en la bahía de Quintero operan en dicha zona y no en puerto Valparaíso.

A base de lo abordado en el capítulo 4 y específicamente en esta sección se puede definir que los remolcadores que se encuentran de manera permanente en VAP son los que representan el mayor número de emisiones, ya que su participación en las maniobras portuarias es constante (RAM “Mataquito” II y RAM “Halcón II”) a diferencia del resto de la flota. El RAM “Loncura” y RAM “Horcón” tienen una modalidad de operación a base de la demanda de la bahía Quintero y bahía de Valparaíso, pero operan aproximadamente 15 días al mes en el puerto de Valparaíso. Y por parte del RAM “Poderoso” su participación en maniobras en VAP es baja, inclusive en los últimos meses CPT Towage ha destinado su recurso netamente a la bahía de Quintero, este RAM realiza zarpes a la bahía de VAP cuando su operación queda liberada.

En la tabla 3 adjunta a continuación, se observa la estimación de las emisiones de cada recurso y el total de las emisiones de la flota en el transcurso de un año. Se especifica su nivel de participación en las faenas portuarias en el puerto de Valparaíso en base a su historial de operación.

RAM	Disponibilidad en VAP (%)	Emission BASE (T CO ₂ e)	Emission ESTIMADA (T CO ₂ e)
MATAQUITO II	100%	0,9802	0,98017601
HALCÓN III	100%	0,9802	0,98017601
HORCON	50%	0,9802	0,4901
LONCURA	50%	0,9802	0,4901
PODEROSO I	20%	0,9802	0,1960352
		Total	3,13656324

Tabla 3: Estimación de emisiones de la flota RAM

Cabe mencionar que las emisiones estimadas para cada remolcador se calculan considerando su disponibilidad de operación en el puerto de Valparaíso (VAP), multiplicado con las emisiones calculadas para un remolcador base. Luego de sumar todas las emisiones de la flota de RAM que opera en Puerto Valparaíso, se estima una producción de 3,1 toneladas de CO₂ al año, lo cual es equivalente a las emisiones de un vehículo que recorre 12789 km al año, si se hace el símil con el transporte carretero. Lo cual se puede ver como un número pequeño, pero es un aporte negativo e influyente en la contaminación que afecta directamente a los ciudadanos de Valparaíso, ciudad puerto.

4. ALTERNATIVAS DE TECNOLOGÍAS EN MATRICES ENERGÉTICAS

En esta sección se describen las 4 tecnologías que están en vías de desarrollo para una futura comercialización o implementación de las nuevas matrices energéticas que buscan reemplazar a los combustibles fósiles.

4.1 Hidrógeno Verde

Se denomina hidrógeno verde al que se ha obtenido mediante fuentes y energías renovables. Este elemento es utilizado como combustible y su principal característica es que produce cero emisiones de CO₂. Es decir, el hidrógeno verde no emite GEI lo que lo transforma en un elemento muy útil para estos tiempos en donde el calentamiento global aumenta día a día producto de los combustibles fósiles utilizados alrededor del mundo. El H₂V no emite gases de efecto invernadero, ya que el

consumo de su energía genera simplemente agua, y el agua en sí no genera ningún tipo de contaminación (Ministerio de Energía, Sf).

En cuanto a la capacidad y potencia, la mayor peculiaridad de este tipo de hidrógeno para su uso como combustible es su alta densidad energética lo que conlleva a tener en una leve cantidad de masa una alta capacidad de energía inclusive mucho más densa que algunos de los principales combustibles fósiles utilizados actualmente como el petróleo y el gas. Otra peculiaridad para considerar es que al ser un gas liviano ocupa gran cantidad de volumen por lo cual se requiere comprimirlo a altas presiones o licuarlo a muy bajas temperaturas todo esto con el fin de aumentar su potencial. A través de avances de innovación cada vez se van creando mejores métodos que incrementan sus capacidades y aprovechan de mejor forma su potencial (Ministerio de Energía, Sf).

En cuanto al valor del hidrógeno verde, The International Renewable Energy Agency (IRENA) es una organización que fomenta a los países a experimentar transiciones energéticas renovables. De esta misma forma IRENA determina en 2019 que la producción del hidrógeno verde actualmente no es competitiva por su alto valor de producción, ya que el valor del hidrógeno gris (producida a partir de combustibles fósiles) cuesta entre 1,5 a 2,5 USD/kg, mientras que el valor del verde va desde los 2,5 a 7 USD/kg. Sin embargo se prevé que para el año 2030 el valor del hidrógeno verde rondará los 2 USD/kg y para el año 2050 tendrá un valor cercano a 1 USD/kg (The International Renewable Energy Agency, 2020).

Por otro lado la tecnología del hidrógeno puede ser aplicada en MCI y a través de una pila de combustible de hidrógeno que alimenta a las baterías de un motor eléctrico por lo que su aplicación es factible en ambas motorizaciones.

4.2 Metanol Verde

El metanol verde se produce a partir de fuentes de energía renovable, como el hidrógeno verde, la energía eólica, la energía solar y la biomasa. Es un líquido que se mantiene en estado líquido a temperatura y presión normales, lo que facilita su transporte. Puede utilizarse como biocombustible en motores MCI de transporte marítimo con mínimas adaptaciones y alimentar celdas de combustible eléctricas, lo que aumenta su versatilidad (Iberdrola, 2023).

Su valor depende del costo del hidrógeno verde y del CO₂, estimándose alrededor de 1700 USD/t (Gielen, 2021). Aunque tiene una densidad energética inferior a los combustibles fósiles, su fácil manejo y capacidad de combustión similar a los fuelóleos pesados lo hacen atractivo para la descarbonización en la industria marítima. Empresas navieras como MAERSK, EVERGREEN, COSCO SHIPPING, CMA CGM y HMM están invirtiendo en embarcaciones impulsadas por metanol junto con motores dual fuel.

4.3 Amoníaco Verde

El amoníaco verde se obtiene a partir del H₂V y posee una baja densidad energética similar al metanol, su almacenamiento puede ser tanto líquido como gaseoso y su valor ronda 4,5 a 6 USD/kg. Para abordar los desafíos relacionados con el costo y la seguridad del almacenamiento y transporte del H₂V, se propone convertirlo en amoníaco durante la producción, así se aprovechan sus propiedades químicas para un almacenamiento y transporte seguros y económicos (López, 2022).

Los principales inconvenientes del amoníaco como combustible son su toxicidad, que puede representar un peligro para la salud si se maneja incorrectamente, y la generación de emisiones de óxido de nitrógeno (NOx) durante su combustión, lo que contribuye a las emisiones de gases de efecto invernadero.

4.4 Motorizaciones Eléctricas

Un motor eléctrico es un tipo de motorización que obtiene su energía eléctrica a través de un sistema de alimentación que proviene de las baterías de litio y la transforma en energía mecánica. Si bien su operación es libre de emisiones de GEI no está exenta del todo, ya que tanto su producción y origen de la fuente energética para la carga de sus baterías de litio es de una fuente no renovable por lo que indirectamente tiene su huella de carbono.

Comparado con los motores de combustión interna (MCI), los motores eléctricos tienen menos piezas móviles, lo que reduce el costo de mantenimiento y operación a largo plazo, sin embargo, su costo inicial es más alto.

Los motores eléctricos son altamente eficientes, con una eficiencia superior al 90%, en contraste con los MCI que tienen una eficiencia en el rango del 15% al 30%. Esto resulta en una menor pérdida de energía y un uso más eficiente de los recursos, pero problemas en su acotada duración de energía y tiempos de carga presentan serios inconvenientes al transporte marítimo.

En base a lo anterior, se presentan las motorizaciones híbridas que combinan motores de diferentes tipos, como motores eléctricos y MCI, para maximizar la eficiencia del combustible y reducir las emisiones de GEI. En embarcaciones, el motor eléctrico se utiliza a potencias medias y bajas, y si se agotan las baterías, el MCI se activa para propulsar la embarcación y recargar las baterías eléctricas una vez que se haya agotado la carga, permitiendo una operación continua (Beta Marine Spain, 2021).

5. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

Independientemente de la factibilidad de la adaptación de la tecnología, sí o sí el rubro de remolcadores nacional requiere de la transición energética con el fin de mitigar la contaminación atmosférica. El servicio de remolque representa significativas emisiones que en primer lugar se ignoran por organismos como el MARPOL y la OMI que se enfocan en descarbonizar a barcos de grandes esloras, pero se dejan de lado a embarcaciones pequeñas desconsiderando su impacto ambiental.

Los únicos requisitos para la operación de un remolcador se basan en su capacidad de tracción, estabilidad y control, pero no hay ninguna restricción de tipo ambiental que impida el funcionamiento de un RAM que contamine sin ningún criterio.

En este estudio, se propuso el uso de H2V (hidrógeno verde) como una solución efectiva para disminuir la huella de carbono en los remolcadores de alta mar en puertos. A través del análisis de diversas fuentes y estudios relacionados, se concluye lo siguiente:

1. El uso de H2V en remolcadores de alta mar puede reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que el hidrógeno produce energía sin generar emisiones de carbono durante su combustión.

2. La implementación de esta propuesta requerirá un cambio en la infraestructura y tecnología de los remolcadores, incluyendo la instalación de sistemas de almacenamiento y suministro de hidrógeno a bordo.
3. Se identificaron desafíos técnicos y económicos que deben abordarse para una adopción exitosa del H2V en remolcadores de alta mar, como la disponibilidad de infraestructuras de producción y suministro de hidrógeno, así como el costo y la eficiencia de los sistemas de propulsión de hidrógeno.
4. La colaboración entre las autoridades portuarias, los operadores de remolcadores, los proveedores de tecnología y otros actores relevantes será fundamental para impulsar la implementación de esta propuesta y superar los obstáculos mencionados.

Basado en los resultados y conclusiones de este estudio, se identifican varias áreas para futuros trabajos de investigación:

1. Evaluación de la viabilidad económica de la implementación del H2V en remolcadores de alta mar, incluyendo un análisis de los costos operativos y de mantenimiento a largo plazo en comparación con las soluciones convencionales.
2. Investigación sobre el desarrollo de tecnologías de almacenamiento y suministro de hidrógeno más eficientes y seguras, que puedan satisfacer las demandas específicas de los remolcadores de alta mar en puertos.
3. Estudios de caso y análisis de impacto ambiental comparativo entre remolcadores propulsados por H2V y los sistemas de propulsión tradicionales, considerando factores como la reducción de emisiones, la calidad del aire en los puertos y los efectos en la salud humana.
4. Investigación sobre la integración de fuentes de energía renovable para la producción de hidrógeno verde, como la energía eólica o solar, en los puertos para respaldar la demanda de los remolcadores de alta mar.

Estos futuros trabajos pueden proporcionar una mayor comprensión de los beneficios, desafíos y oportunidades asociados con el uso de H2V en remolcadores de alta mar, y ayudarán a impulsar la transición hacia una industria portuaria más sostenible y con una menor huella de carbono.

REFERENCIAS

- Anish. (8 de diciembre de 2020). *A Guide To Marine Gas Oil and LSFO Used On Ships*. Obtenido de Marine in sight: <https://www.marineinsight.com/guidelines/a-guide-to-marine-gas-oil-and-lsfo-used-on-ships/>
- Beta Marine Spain. (2021). *Motores marinos y grupos electrógenos*. Obtenido de Beta Marine Spain: <https://betamarinespain.es/motores-de-alta-mar/propulsion-hibrida/>

- Collins, J. (9 de Noviembre de 2022). *Transporte marítimo, un lastre para el medio ambiente*. Obtenido de Deutsche Welle: <https://www.dw.com/es/transporte-mar%C3%ADtimo-un-lastre-para-el-medioambiente/a-63703002>
- Dirección general del territorio marítimo y de marina mercante. (2017). *Análisis Estadísticas Portuarias*. Obtenido de DIRECTEMAR: <https://www.directemar.cl/directemar/estadisticas-maritimas/analisis-estadisticas-portuarias>
- Eng, J. M. (2020). *Nitrogen Oxides and Particulate Matter from Marine Diesel Oil (MDO), Emulsified MDO, and Dimethyl Ether Fuels in Auxiliary Marine Engines*. Obtenido de MDPI: <https://www.mdpi.com/2077-1312/8/5/322>
- Gielen, D. (noviembre de 2021). Methanol as a scalable zero emission fuel. Obtenido de Global maritime forum: <https://www.globalmaritimeforum.org/news/methanol-as-a-scalable-zero-emission-fuel>
- Iberdrola. (2023). Metanol verde: el combustible que puede acelerar la transición energética del transporte marítimo. Obtenido de Iberdrola: <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/metanol-verde#:~:text=Se%20denomina%20metanol%20verde%20a,a%20partir%20de%20hidr%C3%B3geno%20verde>
- International Maritime Organization . (13 de abril de 2018). *UN body adopts climate change strategy for shipping*. Obtenido de International Maritime Organization (IMO: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/06GHGinitialstrategy.aspx>
- Jameson, P. (15 de Febrero de 2023). *ESG in Shipping: Securing real value towards a more sustainable industry*. Obtenido de Linkedin: https://www.linkedin.com/pulse/esg-shipping-securing-real-value-towards-more-industry-jameson?trk=public_profile_article_view
- Jameson, P. J. (22 de agosto de 2022). *Linkedin*. Obtenido de Shipping decarbonization: why is no one speaking about tugs?: <https://www.linkedin.com/pulse/shipping-decarbonization-why-one-speaking-tugs-peter-jonathan-jameson/#:~:text=Today%2C%20over%2021'000%20tug,7%20million%20cars%20per%20year>
- Lack, D. B. (9 de julio de 2008). *Green cars progress*. Obtenido de Study finds large cargo ship soot emissions 2x previous estimates; tugboats are top emitters per unit of Fuel: <https://www.greencarcongress.com/2008/07/study-finds-lar.html>
- López, J. (8 de marzo de 2022). Hidrogeno verde. Obtenido de La guerra en Ucrania hace que el hidrógeno verde sea más barato que el gris: <https://hidrogeno-verde.es/guerra-de-ucrania-hidrogeno-verde/>
- Ministerio de Energía. (s.f). *energia gobierno chile*. Obtenido de Ministerio de Energía: <https://energia.gob.cl/h2/Qu%C3%A9-es-el-hidr%C3%B3geno-verde>
- Ministerio de Energía. (s. f.). *Energía gobierno Chile*. Obtenido de Estrategia nacional de hidrógeno verde: <https://energia.gob.cl/h2/Estrategia-nacional-de-hidrogeno-verde#:~:text=La%20estrategia%20nacional%20de%20hidr%C3%B3geno,un%20proceso%20de%20consulta%20p%C3%ABlica>
- MundoMaritimo. (10 de Junio de 2021). *La OMI y sus avances en la reducción de los gases de efecto invernadero en el transporte marítimo*. Obtenido de MundoMaritimo: <https://www.mundomaritimo.cl/noticias/la-omi-y-sus-avances-en-la-reduccion-de-los-gases-de-efecto-invernadero-en-el-transporte-maritimo>

Oiltanking. (Sf). *Marine Diesel Oil (MDO) & Intermediate Fuel Oil (IFO)*. Obtenido de Oiltanking: <https://www.oiltanking.com/en/news-info/glossary/marine-diesel-oil-mdo-intermediate-fuel-oil-ifo.html>

Sánchez, J. (12 de noviembre de 2019). *ecologiaverde.com*. Obtenido de Cómo afecta la tecnología al medio ambiente: <https://www.ecologiaverde.com/como-afecta-la-tecnologia-al-medio-ambiente-1205.html>

The International Renewable Energy Agency. (2020). *Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs*. Abu Dhabi: IRENA.

Wood T, M. N. (14 de Mayo de 2023). *maritime transport fuels emissions*. Obtenido de Marinelink: <https://www.marinelink.com/news/maritime-transport-fuels-emissions-502716>