

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE



ESTUDIO DE MEDIDAS PARA LA MITIGACIÓN DE
EMISIONES CONTAMINANTES PRODUCIDAS POR
EMBARCACIONES MARÍTIMAS EN LOS PUERTOS DE
QUINTERO

LUCAS ALONSO MARIN DEL VALLE

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: DR. MAURICIO OSSES ALVARADO

PROFESOR CO-REFERENTE: JUAN CARLOS BORDONES

24-12-2024

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre y a mis amigos Nicolás Acevedo y Alejandro Bravo, ya que sin su apoyo y compañía durante tiempos difíciles, esto no hubiera sido posible.

Agradecimientos

Hago un agradecimiento la firma AMBIOSIS y particularmente al profesor Juan Carlos Bordones por ayudarme con la realización de este trabajo.

Agradecimientos al proyecto FONDECYT REGULAR Número 1241477 por su apoyo en el desarrollo de este trabajo de memoria.

Resumen

Durante estos últimos años se ha convertido en una labor relevante la protección del medio ambiente, esto se debe principalmente al cambio climático que ha estado viviendo el planeta, donde es cada vez más frecuente que se presenten anomalías medioambientales las cuales pongan el peligro el bienestar o la calidad de vida de las personas y de los ecosistemas en los que el hombre esta inmersos. En consecuencia, resulta relevante que tantos órganos gubernamentales y privados se vean en la necesidad de estudiar y analizar las influencias que tienen las actividades del hombre sobre el medio ambiente y reducir los impactos.

En esta investigación se realiza un breve análisis de la situación de la industria del transporte naviero, donde se evidencia su relevancia para sostener la sociedad y crecimiento que ha manifestado en esto últimos años debido a diversos factores como la globalización. Esto ha llevado que una porción de los gases contaminantes sean responsabilidad de este sector (cerca de un 3%), lo que lleva a que la sociedad busque soluciones a este problema por razones económicas o sociales.

Esta memoria tiene como objetivo realizar un estudio de medidas para la mitigación de emisiones contaminantes producidas por embarcaciones marítimas en los puertos de Quintero. Para ello se realizó una revisión de soluciones de mitigación de gases contaminantes en la literatura académica, donde se logró recopilar y clasificar un total de 24 medidas de mitigación. Estas medidas de mitigación debieron ser evaluadas respecto a su efectividad en base a los antecedentes recopilados, para ello se propuso una metodología de estimación de emisiones de gases contaminantes que permitiera determinar los niveles de gases contaminantes que se producen en la bahía de Quintero. Una vez tomadas las consideraciones necesarias y analizando la información de los barcos de la bahía, se estimó el nivel emisiones por el transporte naviero, se obtuvo que generó durante el 2023: 12.940 toneladas de óxidos nitrosos NOx, 564 toneladas de monóxido de carbono, 217 toneladas de compuesto orgánicos volátiles distintos de metano, 38 toneladas de óxidos de azufre, 3,9 toneladas de amoniaco, 866 toneladas de material particulado, 528.200 toneladas de dióxido de carbono, 4 toneladas de metano y 25 toneladas de óxido nitroso N2O.

Al aplicar comparar las medidas mitigación recopiladas se recomienda la implementación del uso de gas licuado (LNG) con un sistema híbrido eléctrico, la instalación del sistema On Shore Power (OPS) y la instalación del sistema de amarrado automático (AMS) como un plan de mitigación de emisiones transitorio competente. Al estimar el porcentaje de reducción de estas medidas aplicadas a los tres modos de operación se obtuvo: 78,14% de óxidos nitrosos NOx, 28,28% de monóxido de carbono, 27,06% de compuesto orgánicos volátiles distintos de metano, 97,69% de óxidos de azufre,

27,56% de amoníaco, 88,06% de material particulado, 25,67% de dióxido de carbono, 27,02% toneladas de metano y 27,08% toneladas de óxido nitroso N₂O.

Abstract

In recent years, protecting the environment has become an important task, primarily due to the climate change affecting the planet, where environmental anomalies increasingly endanger people's well-being and quality of life, as well as the ecosystems in which they are immersed. Consequently, it is important that both government and private entities feel the need to study and analyze the impact of human activities on the environment and reduce such impacts.

This research provides a brief analysis of the maritime transport industry, highlighting its significance in sustaining society and the growth it has experienced in recent years due to various factors, such as globalization. This sector is responsible for a portion of pollutant gases (around 3%), which prompts society to seek solutions to this problem for economic and social reasons.

The objective of this study is to examine measures for mitigating pollutant emissions produced by maritime vessels in the ports of Quintero. To this end, a review of pollutant gas mitigation solutions in academic literature was conducted, through which a total of 24 mitigation measures were collected and classified. These mitigation measures were then evaluated in terms of their effectiveness, based on the gathered data, and an emission estimation methodology was proposed to determine the levels of pollutant gases produced in Quintero Bay. After gathering and analyzing information on the bay's vessels, it was estimated that maritime transport generated the following emissions in 2023: 12.940 tons of nitrogen oxides (NO_x), 564 tons of carbon monoxide, 217 tons of non-methane volatile organic compounds, 38 tons of sulfur oxides, 3,9 tons of ammonia, 866 tons of particulate matter, 528.200 tons of carbon dioxide, 4 tons of methane, and 25 tons of nitrous oxide (N₂O).

After comparing the collected mitigation measures, it is recommended to implement the use of liquefied natural gas (LNG) with a hybrid electric system, install an On Shore Power (OPS) system, and install an Automatic Mooring System (AMS) as a viable temporary emissions mitigation plan. Estimated reductions from applying these measures across the three modes of operation are as follows: 78,14% for nitrogen oxides (NO_x), 28,28% for carbon monoxide, 27,06% for non-methane volatile organic compounds, 97,69% for sulfur oxides, 27,56% for ammonia, 88,06% for particulate matter, 25,67% for carbon dioxide, 27,02% for methane, and 27,08% for nitrous oxide (N₂O).

Glosario

AE: Motor Auxiliar.

AMS: Automated Mooring o Amarrado Automático.

ARB: Air Resources Board o Junta de Recursos de Aire.

CCMT: Tecnologías de Mitigación del Cambio Climático.

CFD: Computational Fluid Dynamics o Dinámica de Fluidos Computacional.

CIV: Complejo Industrial Ventanas.

CO: Monóxido de Carbono.

CO2: Dióxido de Carbono.

COV: Compuesto Orgánicos Volátiles.

DIRECTEMAR: Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante.

DS: Decreto Supremo.

DWI: Direct Water Injection o Inyección Directa de Agua.

ECA: Estándares de Calidad Ambiental.

EEDI: Índice de Diseño de Eficiencia Energética.

EGR: Recirculación de Gases de Escape.

EMEP: European Monitoring and Evaluation Programme o Programa de Monitoreo y Evaluación Europeo.

FE: Factor de Emisión.

FTL: Tubo de Luz Fluorescente.

GEI: Gas de Efecto Invernadero.

GNL o LNG: Gas Natural Licuado.

GTL: Gas to Liquids Fuel o Combustible de Gas a Liquido.

H₂: Hidrogeno.

HAWT: Turbinas Eólicas de Eje Vertical.

HCNM: Hidrocarburos No Metálicos.

HFO: Fuelóleo Pesado.

kW: kilo Watt

LED: Light Emitting Diode o Diodo Emisor de Energía.

LIP: Asociación Localmente Integrada.

MARPOL: Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques.

MD: Destilado Marino

MDO: Marine Diesel Oil u Diesel marino.

MGO: Marine Gas Oil o Gasóleo marino.

ME: Motor Principal.

MINSEGRES: Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

MMA: Ministerio del Medio Ambiente.

NASA: National Aeronautics and Space Administration o Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio.

NECA: Áreas Control de Emisiones de NOx.

NH3: Amoníaco.

NOx: Oxidos de Nitrogeno.

NTP: Plasma No Térmico.

OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.

OMI o IMO: Organización Marítima Internacional.

ONG: Organización No Gubernamental.

OPS: On shore Power.

OWC: Dispositivos de Columna de Agua Oscilante.

RoPax: Buques de Pasaje de Transbordo Rodado.

PIB: Producto Interno Bruto.

PM10: Material Particulado con un diámetro menor a 10 micrómetros.

PM2.5: Material Particulado con un diámetro menor a 2.5 micrómetros.

PPDA: Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica.

PRAS: Programa para la Recuperación Ambiental y Social.

RILES: Residuos Líquidos Industriales.

RO: Petróleo Negro o Residual.

RoRo: Barco de Transporte de Cargamento Rodado.

SCR o SNSR: Reducción Catalítica Selectiva.

SECA: Áreas de Control de Emisiones de SOx.

SEEMP: Plan de Eficiencia Energética.

SEN: Sistema Eléctrico Nacional.

SMED: Swedish Method for Estimating Emissions o Método Sueco para Estimación de Emisiones.

SOx: Oxidos de Azufre.

TJ: Tera Joule

UE: Unión Europea.

UNCTAD: Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo.

VAWT: Turbinas Eólicas de Eje Vertical

WDPS: Sistema de Propulsión Devoradora de Olas.

WEC: Conversión de Energía de las Olas.

WHRS: Sistema de Recuperación de Calor Residual.

Índice de contenidos

Dedicatoria	1
Agradecimientos	2
Resumen	3
Abstract	4
Glosario	5
Índice de contenidos	9
Índice de figuras	11
Introducción	14
Objetivos	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
1 ESTADO DEL ARTE	16
1.1 Desarrollo económico de los puertos	16
1.2 Emisiones de la industria naviera	18
1.3 Incentivos a la búsqueda de soluciones para emisiones navieras	20
1.4 Caso de Estudio: Puerto de Quintero	23
1.5 Soluciones de mitigación en el transporte naviero	26
1.5.1 Embarcaciones	26
1.5.1.1 Gestión	26
1.5.1.2 Combustibles alternativos	30
1.5.1.3 Tecnología	38
1.5.2 Puerto	49
1.5.2.1 Gestión	49

1.5.2.2 Tecnología	53
1.6 Conclusiones del Capítulo	57
2 METODOLOGÍA DE CÁLCULO	59
2.1 Nivel de Actividad Marítimo	60
2.1.1 Bases de Datos Modo Marítimo	62
2.1.2 Trabajo Previo de la Información Modo Marítimo:	63
2.2 Cálculo de Emisiones Modo Marítimo	63
2.2.1 Factores de Emisión	64
2.2.2 Cálculo de Emisión de Gases Contaminantes	65
2.3 Metodología de Georreferenciación	67
2.4 Supuestos	68
2.5 Conclusiones del Capítulo	69
3 RESULTADOS NIVEL DE EMISIONES	71
3.1 Nivel de emisiones Marítimas	71
3.2 Conclusiones del Capítulo	80
4 EFECTIVIDAD EN LA MITIGACIÓN EMISIONES	81
4.1 Mitigación de emisiones en modo crucero	81
4.2 Mitigación de emisiones en modo maniobra	85
4.3 Mitigación de emisiones en modo puerto	85
4.4 Resultados generales de mitigación de emisiones	87
4.5 Conclusiones del Capítulo	92
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
4.1 Conclusión general	93
4.2 Conclusiones específicas	94
4.3 Recomendaciones	98
Bibliografía	100

Índice de figuras

Figura 1-1: Gráfica de comercio marítimo mundial por tipo de carga entre los años 1970-2018. (Claudio Flores, 2023).	
Figura 1-2: Emisiones de GEI del transporte en la UE. (Extraída de www.europarl.europa.eu).	
Figura 1-3: Aumento de las citaciones e investigaciones de CCMT. (Extraída de Zhang Z et al, 2024)	
Figura 1-4: Área del Puerto de Quintero y Puchuncaví. (Imagen cortesía de AMBIOSIS).....	
Figura 1-5: Barco Híbrido SOLAR SAILOR. (Extraída de www.solarnavigator.net).	
Figura 1-6: Barcos prototipo que funcionan a partir de energía solar. (Extraída de (Tuswan T et al., 2022)).	
Figura 1-7: Barco con vela cometa. (Extraída de (Issa M et al., 2022)).	
Figura 1-8: Esquema del sistema de suministro del aire a la sección del barco. (Extraída de (Issa M et al., 2022)).	
Figura 1-9: Esquema conceptual de la Gestión Verde, ciclo de transporte verde. (Extraída de (Zhang et al., 2024)).	
Figura 1-10: Esquema conceptual de la Gestión Verde, indicadores de desempeño verde. (Extraída de (Zhang et al., 2024)).	
Figura 1-11: Sistema automático de Mooring con ventosas. (Extraída de (Díaz-Ruiz-Navamuel E et al., 2018)).	
Figura 1-12: Imagen referencial de las 3 partes más importantes del sistema OPS. (Extraída de Kim A et al., 2023).	
Figura 2-1: Datos de los tipos de embarcación analizados, información de acuerdo a “UK Ship Emissions Inventory” de ENTEC UK del 2010.....	
Figura 2-2: Factores de emisión de las embarcaciones asociados al modo crucero, elaborado a partir de “Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors” de SMED. ...	
Figura 2-3: Factores de emisión de las embarcaciones asociados al modo maniobra, elaborado a partir de “Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors” de SMED. ...	
Figura 2-4: Factores de emisión de las embarcaciones asociados al modo puerto, elaborado a partir de “Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors” de SMED. ...	

Figura 2-5: Interfaz del sitio Sea Rates.	
Figura 3-1: Características técnicas relevantes para el cálculo de emisiones para buques del tipo GRL Y TLE.....	
Figura 3-2: Rutas de navegación en altamar más recorridas por barcos del puerto de Quintero junto con su recorrido y recaladas	
Figura 3-3: Factores de emisión para barcos en modo crucero para motores del tipo de velocidad media y lenta, en gramo de gas por kilowatt-hora de potencia	
Figura 3-4: Emisiones totales de los barcos circundantes en los puertos de Quintero en modo crucero, con el tonelaje de emisiones totales según el tipo de contaminante.....	
Figura 3-5: Extracto de la base de datos del inventario de barcos para obtener el tiempo de maniobra	
Figura 3-6: Factores de emisión para barcos en modo maniobra para motores del tipo de velocidad media y lenta, en gramo de gas por kilowatt-hora de potencia	
Figura 3-7: Emisiones totales de los barcos circundantes en los puertos de Quintero en modo maniobra, con el tonelaje de emisiones totales según el tipo de contaminante.....	
Figura 3-8: Extracto de la base de datos del inventario de barcos para obtener el tiempo que los barcos están en modo puerto	
Figura 3-9: Factores de emisión para barcos en modo puerto para motores del tipo de velocidad media, en gramo de gas por kilowatt-hora de potencia.....	
Figura 3-10: Emisiones totales de para barcos circundantes en los puertos de Quintero en modo puerto, con el tonelaje de emisiones totales según el tipo de contaminante.....	
Figura 3-11: Emisiones totales de los barcos circundantes en los puertos de Quintero de todos los modos, con el tonelaje de emisiones totales según el tipo de contaminante.	
Figura 3-12: Nivel de emisión de NOx para los tres modos de operación en toneladas	
Figura 3-13: Nivel de emisión de CO2 para los tres modos de operación en toneladas	
Figura 3-14: Nivel de emisión de PM para los tres modos de operación en toneladas	
Figura 3-15: Nivel de emisión de SOx para los tres modos de operación en toneladas.....	
Figura 4-1: Coeficientes de reducción de emisiones para cada medida de mitigación escogida	
Figura 4-2: Emisiones totales del modo crucero junto con las emisiones reducidas del mismo, incluye también el porcentaje de reducción efectivo por contaminante	

Figura 4-3: Emisiones totales del modo maniobra junto con las emisiones reducidas del mismo, incluye también el porcentaje de reducción efectivo por contaminante.....

Figura 4-4: Emisiones totales del modo puerto junto con las emisiones reducidas del mismo, incluye también el porcentaje de reducción efectivo por contaminante.

Figura 4-5: Emisiones totales de todos los modos de operación junto con las emisiones reducidas de los mismo, incluye también el porcentaje de reducción efectivo por contaminante

Figura 4-6: Nivel de emisiones de NOx totales en comparación a las reducidas para cada uno de los modos de operación.....

Figura 4-7: Nivel de emisiones de CO2 totales en comparación a las reducidas para cada uno de los modos de operación.....

Figura 4-8: Nivel de emisiones de PM totales en comparación a las reducidas para cada uno de los modos de operación.....

Figura 4-9: Nivel de emisiones de SOx totales en comparación a las reducidas para cada uno de los modos de operación.....

Introducción

En estos últimos años, en el mundo se ha convertido en una labor fundamental la protección del medio ambiente, esto se debe principalmente al cambio climático que ha estado viviendo el planeta, donde con cada vez es más frecuente que se presenten anomalías climáticas y ambientales las cuales pongan en peligro el bienestar o la calidad de vida de las personas y de los ecosistemas en los que estas personas están inmersos. En consecuencia, resulta relevante que tanto órganos gubernamentales y privados se vean en la necesidad de estudiar y analizar las influencias que tienen las actividades del hombre sobre el medio ambiente, para así comprender sus causas y efectos, de manera de poder encontrar una solución práctica y económica para reducir los impactos medioambientales. Es por esto que se realizan con mayor frecuencia, y tratando de ser lo más realistas posibles, estudios que permitan conocer por ejemplo las emisiones de gases de efecto invernadero, principales responsables del cambio climático.

Dentro de este contexto están involucrados los entornos portuarios, los cuales funcionan como grandes nodos de comunicación en los que se desarrollan diversas actividades vinculadas al transporte marítimo, estas actividades abarcan distintos sectores tales como el transporte, el sector industrial o la gestión de residuos. Estas actividades portuarias tienen un impacto considerable en la calidad del aire del entorno y, por tanto, en la salud de los ciudadanos. Durante las últimas décadas el transporte marítimo ha experimentado un enorme desarrollo, debido en parte al crecimiento del comercio con economías emergentes como China e India, y en otra parte más general, a los efectos de la globalización en el sector comercial, donde cada vez es más frecuente una comercialización más amplia o masiva. Esto hace que las Autoridades Portuarias deban disponer de herramientas que le permitan conocer cuáles son las actividades que más peso tienen en la contaminación del entorno portuario, así como herramientas que permitan anticiparse y evitar operaciones portuarias que eleven los niveles de contaminación.

En este trabajo se desarrolla un estudio de antecedentes los cuales puedan orientar la solución a la reducción de las emisiones en los puertos de Quintero. Esta investigación se hizo con la ayuda de AMBIOSIS, firma de gestión de soluciones ambientales la cual el Ministerio del Medio Ambiente le encargó el desarrollo de un proyecto para reducir las emisiones que aportan las embarcaciones marítimas en la bahía de Quintero.

En esta investigación se evaluará la efectividad de las soluciones de mitigación recopiladas en la literatura académica, soluciones que podrían permitir la reducción de las emisiones en los puertos. Estas medidas se evaluarán por medio de la estimación de las emisiones anuales producidas por las embarcaciones portuarias de los puertos de Quintero para el año 2023 tanto en el área del

puerto como en altamar, proponiendo así también un método de estimación que incorpore estas soluciones de mitigación.

Objetivos

Para el desarrollo de este trabajo, se presenta el objetivo general y los objetivos específicos necesarios para que este primero sea alcanzado.

Objetivo general

Realizar un estudio de medidas para la mitigación de emisiones contaminantes producidas por embarcaciones marítimas en los puertos de Quintero.

Objetivos específicos

1. Realizar una revisión bibliográfica de la estimación y mitigación de las emisiones de embarcaciones portuarias en Chile y el mundo.
2. Estimar las emisiones generadas por las embarcaciones de Quintero para el año 2023.
3. Analizar la efectividad de las soluciones de mitigación recopiladas para reducir las emisiones de las embarcaciones tanto en el puerto de Quintero como en altamar.
4. Proponer medidas de mitigación para las emisiones contaminantes producidas por embarcaciones portuarias en Quintero.

1 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presenta una síntesis acerca de la información que se tiene respecto a los niveles de actividad y emisiones producidas por el transporte marítimo. Se realiza una revisión general del papel y desarrollo de las medidas de reducción de emisiones, estableciendo por qué son relevantes, el nivel de emisiones a lo largo de los últimos años, las motivaciones en su desarrollo y las instituciones sociales responsables de encontrar estas soluciones.

El capítulo incluye una recopilación de múltiples medidas de mitigación provenientes de investigaciones académicas que buscan reducir las emisiones contaminantes en el transporte naviero, estas se proponen en función del contexto operacional del buque o respecto a algún aspecto técnico que cubre.

El capítulo también incluye una revisión del caso de estudio, la situación de los puertos de Quintero, en el cual se busca evaluar el uso de las medidas estudiadas, definiendo el contexto ambiental bajo el cual se necesitan encontrar estas soluciones, este trata del alto nivel de emisiones contaminantes en la bahía.

1.1 Desarrollo económico de los puertos

En las últimas décadas, con el creciente comercio mundial, el auge del desarrollo de la logística portuaria y marítima ha atraído amplia atención. La expansión del comercio internacional ha dado lugar al movimiento a gran escala de bienes y materias primas, impulsando la expansión continua de las redes logísticas para satisfacer las necesidades de las cadenas de suministro. Esto llevó a un aumento en el volumen del tráfico de carga, estimulando así aún más la construcción portuaria. Numerosos puertos en Europa y Asia han experimentado un rápido crecimiento como se muestra en la figura 1.1, y esto ha mejorado el desarrollo económico en algunos países de esas regiones. (Zhang et al., 2024)

El transporte marítimo se ha expandido un 250 por ciento en los últimos 40 años, al mismo ritmo que el PIB mundial y más rápido que el consumo de energía (170%) y la población mundial (90%). El transporte marítimo es reconocido como un modo de transporte más eficiente energéticamente que otros métodos de transporte debido a su gran capacidad de recolección y su bajo consumo de combustible por tonelada movida. (Tuswan et al., 2022)

El transporte marítimo es un factor crítico de la economía global al representar entre el 80% y el 90% del comercio internacional, este ha sido importante promotor del desarrollo económico al facilitar el comercio entre continentes durante siglos (Karaçay & Özsoysal, 2021a)

Según el informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo (UNCTAD), más del 80% del volumen del comercio internacional de bienes se realiza por mar, y la proporción es aún mayor en el caso de muchas naciones en desarrollo. (Buonomano et al., 2023)

El sector del transporte se considera uno de los sectores imprescindibles porque contribuye significativamente al desarrollo social y económico. Las mejores instalaciones de transporte ayudan a la movilización de la fuerza laboral y ayudan a transferir varios tipos de recursos. El sector del transporte desempeña un papel fundamental al proporcionar servicios de educación y salud de calidad. Además, los servicios de transporte de calidad impulsan el turismo, el comercio y la distribución efectiva, impulsando así el crecimiento económico, como cuando se transfieren recursos de áreas con abundantes recursos a áreas con escasos recursos, permitiendo una reducción en la desigualdad de ingresos. (Bhowmik et al., 2022)

Sin embargo, debido a que las operaciones portuarias y las actividades logísticas suelen ir acompañadas de un aumento del consumo de energía y de las emisiones contaminantes, esto conlleva a un cierto grado de impacto en el medio ambiente circundante, especialmente en el dióxido de carbono (CO₂), un gas de efecto invernadero. (GEI), lo que tiene un impacto significativo en el ecosistema. (Zhang et al., 2024).

Por lo tanto, lo ideal sería que los puertos y barcos en altamar desempeñaran un papel clave en la transición energética hacia un futuro más sostenible. Los puertos sirven como nodos principales en la compleja red de suministro de combustible para el transporte marítimo y son fundamentales para facilitar la descarbonización de la industria naviera, un sector difícil de reducir en términos de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Además, los puertos consumen una cantidad importante de energía y son fuente de diferentes emisiones contaminantes, así como de contaminación acústica nociva y pérdida de biodiversidad. Las emisiones de GEI atribuidas a la industria portuaria ascienden aproximadamente al 3% de las emisiones totales. (Buonomano et al., 2023)

El transporte está sometido a una presión cada vez mayor para reducir los impactos sobre el clima y el medio ambiente. Aunque el transporte marítimo suele considerarse un modo de transporte

respetuoso con el medio ambiente, las emisiones globales del sector marítimo son responsables del 10% al 15% de las emisiones antropogénicas de azufre (SO_x) y óxido de nitrógeno (NO_x), así como aproximadamente el 3% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). (Bjerkan & Seter, 2019)

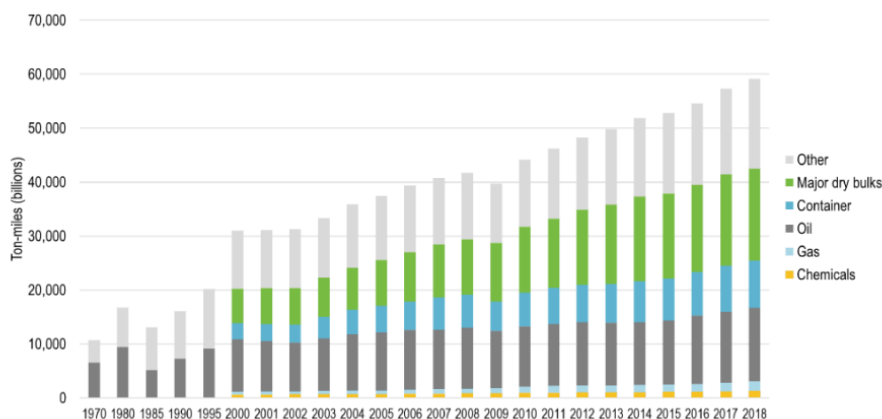


Figura 1.1 : Gráfica de comercio marítimo mundial por tipo de carga entre los años 1970-2018. (Claudio Flores, 2023)

1.2 Emisiones de la industria naviera

La industria naviera tiene aproximadamente una demanda total de energía de 13 millones de TJ, este consumo de energía para el transporte se mantiene relativamente estable en los países de la OCDE para los informes de pronóstico para 2050. La gran mayoría de los buques utilizados en el transporte marítimo están obteniendo la potencia necesaria para la propulsión mediante la quema de combustibles fósiles en motores de combustión. (Karaçay & Özsoysal, 2021)

Durante este proceso de combustión de los barcos se liberan una enorme cantidad de SO_x, NO_x, CO, CO₂ y PM se producen como producto. Estas emisiones de GEI procedentes del transporte marítimo representan alrededor del 3% del total de las emisiones mundiales como se muestra en la figura 1.2. Las regulaciones publicadas por la OMI para limitar los efectos negativos de las emisiones marinas mediante la reducción de NO_x, SO_x y PM de los motores se establecen por medio del convenio de la MARPOL, con estas medidas, se produce un impacto significativo en la refinación de petróleo marino, el mercado de combustible marino y las emisiones marinas con el objetivo de la OMI para reducir al menos el 50% de las emisiones anuales de gases de efecto invernadero procedentes del transporte marítimo de aquí a 2050. Además, estas regulaciones han obligado al sector marítimo a buscar métodos para reducir las emisiones. Actualmente se utilizan y se están

desarrollando tecnologías de reducción de emisiones para cumplir con las normas de la ECA. (Karaçay & Özsoysal, 2021)

Según la Organización Marítima Internacional (OMI), los barcos utilizan alrededor de 300 millones de toneladas de combustibles fósiles cada año. Aunque otras formas de transporte emplean principalmente combustibles fósiles, el sector del transporte marítimo produce alrededor del 3,1% (1130 Mt de CO₂) del total mundial de emisiones de GEI debido a la alta composición del combustible fósil. El fueloil pesado (HFO) representa el 72%, el diésel marino (MDO) el 26% y gas natural licuado (GNL) para el 2%. Además, los barcos liberan contaminantes como óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas (PM), los cuales contribuyen a la contaminación del aire. Dado que las emisiones producidas por los barcos se han convertido en una grave preocupación, el desarrollo de tecnologías eficientes para reducir las emisiones en el sector marítimo ha atraído la atención de la comunidad mundial. (Tuswan et al., 2022)

Los buques militares, los remolcadores y los barcos pesqueros pueden tener consecuencias ambientales críticas. En enero de 2021, alrededor de 15.000 de los aproximadamente 55.000 buques mercantes que viajaban internacionalmente eran buques de carga general. Como resultado, los buques de carga general representaron alrededor del 27% de la flota comercial mundial. (Issa M et al., 2022)

El 33% de todas las emisiones resultantes de la quema de combustibles fósiles en el comercio, incluido el 3,3% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO₂), son atribuibles al transporte marítimo. Los contaminantes del transporte marítimo han aumentado en los últimos 50 años, aunque son difíciles de medir. Alrededor del 70% de las emisiones de contaminantes tradicionales y GEI se producen dentro de un radio de 400 kilómetros de la tierra. (Issa M et al., 2022)

La contaminación antropogénica global del aire está significativamente influenciada por las emisiones de GEI provenientes del transporte marítimo, que incluyen CO₂, metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). Los contaminantes totales del transporte marítimo alcanzaron 961 millones de toneladas de CO₂ equivalente en 2012, frente a 816 millones de toneladas de CO₂ equivalente en 2007. El transporte marítimo generó 0,022 Gg de N₂O-N anualmente en 2010 y se prevé que aumentará en un 20% para 2030. Dado que el transporte marítimo representa el 3% del total de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI), se requieren estrictas normas ambientales que regulan el óxido de nitrógeno (NO_x), el óxido de azufre (SO_x) y el dióxido de carbono. (Issa M et al., 2022)

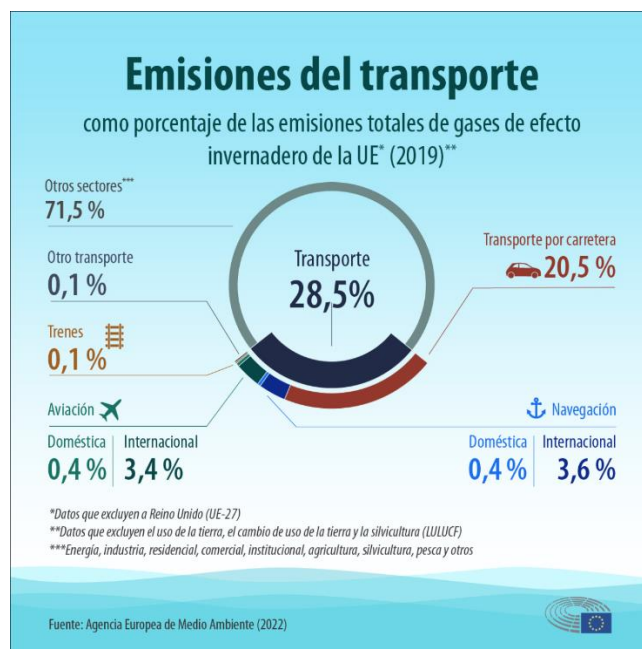


Figura 1.2 : Emisiones de GEI del transporte en la UE. (Extraída de www.europarl.europa.eu)

1.3 Incentivos a la búsqueda de soluciones para emisiones navieras

La innovación verde (es decir, la tecnología relacionada con el medio ambiente) es una solución clave para reducir las emisiones de carbono y mejorar el desempeño. Como parte de la innovación verde, la tecnología de mitigación del cambio climático (CCMT) se centra en frenar el calentamiento global causado por las actividades. La tecnología de mitigación del cambio climático (CCMT) cubre la tecnología en la que los humanos intervienen para disminuir las fuentes de gases de efecto invernadero. La CCMT ha aumentado enormemente en las últimas décadas y se prevé que aumente continuamente, se ha informado que la CCMT ha aumentado a un ritmo mucho mayor que la tasa promedio de aumento de la innovación verde. Algunos estudios han demostrado que la introducción de una política climática estricta, la concentración en la innovación verde, la intensidad de la investigación, la escala económica y una nueva cooperación internacional puede impulsar la innovación CCMT, como se muestra en la figura 1.3. (Wang et al., 2023)

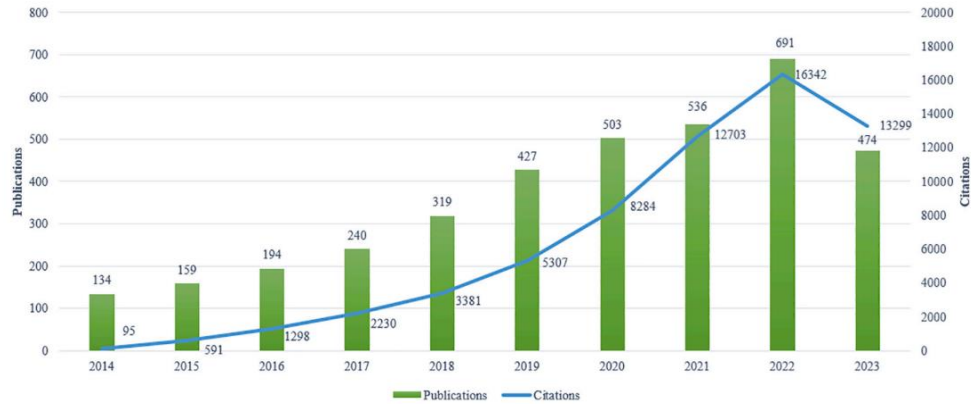


Figura 1.3 : Aumento de las citaciones e investigaciones de CCMT. (Extraída de Zhang Z et al, 2024)

Medidas de organizaciones gubernamentales

De manera de tratar las emisiones portuarias, las entidades gubernamentales promulgan regulaciones ambientales, brindan incentivos y subvenciones, inician desincentivos y utilizan programas de desarrollo de capacidades. Debido a la lenta aplicación de la regulación y los altos costos de las medidas de descarbonización, los esquemas de incentivos son una de las principales herramientas de políticas y gestión, como otra vía para mejorar la adopción de tecnologías de descarbonización. Los puertos podrían ofrecer estos sistemas a los buques que adopten medidas de forma voluntaria y más allá de las reglamentaciones. (Alamouch et al., 2022)

Una de las entidades más relevantes es la OMI, que en respuesta al ascenso del tránsito portuario ha implementado normas estrictas a través del Convenio Internacional Convenio para la prevención de la contaminación por los buques (Convenio MARPOL), como el índice de diseño de eficiencia energética (EEDI) y el plan de gestión de la eficiencia energética de los buques.

Respondiendo al deseo de reducir las emisiones marinas de SO_x en las regiones de algunos países costeros, se establecen Áreas de Control de Emisiones de SO_x (SECA) aplicando las disposiciones de la Regla 14 del Anexo VI del MARPOL. Estas regulaciones limitan el contenido de azufre del combustible marino al 0,1% en masa en las SECA para 2015 y al 0,5% a nivel mundial para 2020. Para controlar las emisiones de NO_x de los motores de barcos nuevos y existentes, existe la regla 13 del Anexo VI del MARPOL. Se definen varios niveles relacionados con la fecha de construcción del buque y la velocidad del motor, mientras que los límites de Nivel I y Nivel II son

globales, los límites de Nivel III son solo para buques nuevos que operan en Áreas de Control de Emisiones de NOx (NECA). Con estas regulaciones, se produce un impacto significativo en la refinación de petróleo marino, el mercado de combustible marino y las emisiones marinas con el objetivo de la OMI de reducir al menos el 50% de las emisiones anuales de gases de efecto invernadero procedentes del transporte marítimo de aquí a 2050. (Karaçay & Özsoysal, 2021)

Intereses privados y sociales

Las empresas y entidades privadas contribuyen a la responsabilidad social corporativa y responden a la presión de las partes interesadas en la búsqueda de soluciones para reducir las emisiones marítimas, como el público, la comunidad y las organizaciones no gubernamentales (ONG) ambientalistas. Además, aunque el impacto del cambio climático es global, los puertos mitigan el precursor del cambio climático (GEI) porque pone en peligro la infraestructura y las operaciones de los puertos. Por último, pero no menos importante, los puertos mejoran la confianza en sus negocios y la “imagen” de reputación verde, mientras que al mismo tiempo los puertos gestionan la seguridad energética y la eficiencia (reducción de costos). (Alamouh et al., 2022)

Factores económicos

Como en toda industria, la búsqueda de tecnologías y la adopción de múltiples medidas técnicas o logísticas para mejorar los procesos están sujetas a los factores económicos los cuales influyen en la industria naviera. Si bien no se considera tan relevante como los factores políticos, uno de los factores que se considera más relevante es el aumento del precio del petróleo.

El aumento de los precios del petróleo puede estimular el consumo de energías renovables en el largo plazo, debido al efecto sustitución o suplemento. Como bien sustituto o complementario de la energía convencional, los precios relativos de la energía renovable tendrán una ventaja durante un período de altos precios del petróleo, y por lo tanto los clientes o empresas se ven motivados a consumir más energía renovable para satisfacer su demanda. Con el crecimiento del uso de energías renovables, los proyectos con nueva tecnología energética parecen más atractivos para los inversores, ya sean del sector privado o de instituciones públicas. Por lo tanto, se espera que la innovación en nuevas tecnologías energéticas aumente en un escenario de altos precios del petróleo. Además, el aumento de los precios del petróleo dará lugar a una reducción inmediata del uso de energía al inducir un consumo prudente de energía. Para ahorrar energía y reducir aún más costos, las entidades del

mercado están más atentas a mejorar la eficiencia energética. Por lo tanto, parecerá que un gran número de tecnologías de eficiencia energética permitirán a los actores del mercado reducir el consumo de energía, lo que ayuda a superar el efecto a largo plazo del aumento de los precios del petróleo en los sectores energéticos. Dado que las tecnologías sobre energía renovable y eficiencia energética desempeñan un papel importante para ayudar a mitigar el cambio climático, el aumento de los precios del petróleo puede ser un importante impulso del mercado para facilitar el crecimiento de la CCMT en innovación verde. (Wang et al., 2023)

1.4 Caso de Estudio: Bahía de Quintero

La comuna de Quintero se ha consolidado como una de las zonas industriales más importantes del país, desde el punto de vista de la capacidad industrial instalada, la actividad económica generada, la gran demanda de mano de obra y la generación de empleo asociada a ella. Su privilegiada ubicación geográfica en la zona central del país cerca de la capital, permitió la construcción de la primera industria en la década del 50 y a la fecha, el Complejo Industrial Ventanas (CIV) suma aproximadamente 14 empresas en esa zona, con distintas actividades económicas que han contribuido a la consolidación de un barrio industrial de amplia envergadura para el país, convirtiendo a esta zona en un lugar extraordinariamente sensible y vulnerable desde el punto de vista ambiental, pues la actividad industrial ha generado diversos impactos en el territorio, dado que su funcionamiento conlleva la generación y liberación de sustancias al ambiente (por ejemplo, emisiones atmosféricas, deposición de cenizas, residuos líquidos industriales (RILES).

En este sentido, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) elaboró el Programa para la Recuperación Ambiental y Social (PRAS) de las comunas de Quintero y Puchuncaví, aprobado por Resolución Exenta N°645 el 2017, que tiene como objetivo recuperar ambientalmente el territorio y mejorar la calidad de vida de los habitantes de las comunas mediante la identificación, a través de un proceso ampliamente participativo, de los principales problemas sociales y ambientales, planteando opciones de solución que la conviertan, en el mediano y largo plazo, en un área que muestre que es posible la convivencia armónica entre las actividades industriales, el cuidado del medio ambiente y una buena calidad de vida. Durante el año 2015 el MMA declara como zona saturada por material particulado fino respirable PM2.5, como concentración anual y latente como concentración diaria y zona latente por material particulado respirable PM10 como concentración anual, a las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví, generándose el año 2018 el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví (PPDA CQP).

El PPDA CQP tiene como objetivo evitar la superación de la norma primaria de calidad ambiental para material particulado respirable MP10 (D.S. N°59/1998 de MINSEGPRES) como concentración anual, y de la norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable MP2.5 (D.S. N°12/2011 del MMA), como concentración de 24 horas, y recuperar los niveles señalados en la última norma mencionada, como concentración anual, en un plazo de 5 años.

Para cumplir la meta del PPDA CQP se regulan principalmente las 3 principales fuentes emisoras Complejo Termoeléctrico Ventanas AES Gener, Codelco División Ventanas, Empresa Nacional del Petróleo (ENAP Refinerías). Para ellas se establece el Congelamiento inmediato de las emisiones de material particulado (MP), dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) y, límites de emisión de MP, SO₂ y NO_x en un plazo de 3 años.

La actividad portuaria es el principal centro de transferencia de gráneles líquidos y sólidos como granos, clínker (producto intermedio para fabricar cemento), combustible, asfaltos, concentrados de cobre y otros minerales además de productos químicos, gas natural y petcoke. En este sentido de acuerdo a lo informado por la Autoridad Marítima en su estudio de emisiones de naves, cuyo objetivo principal fue la estimación de las emisiones de los contaminantes atmosféricos MP10, MP2,5, NO_x, SO₂, compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO) y amoníaco (NH₃), generadas por las embarcaciones marítimas que ingresaron durante el año 2020 a la Bahía de Quintero, Región de Valparaíso, da cuenta de la importancia al menos, de las emisiones de NO_x en la Bahía.

Por otra parte, el potencial incremento del transporte marítimo de mercancías implicará una mayor actividad y un crecimiento potencial de algunas instalaciones portuarias y los gases contaminantes producidos tanto por las instalaciones energéticas de los buques como por los estanques (buques químicos) y las emisiones fugitivas generadas en las distintas faenas (transferencias, alijes, etc.), pueden comprometer la calidad del aire y el cumplimiento de las normas de calidad primaria en los núcleos urbanos adyacentes.

Es importante considerar que el sector marítimo está comprometido con la reducción de Gases Efecto Invernadero (GEI) y las emisiones contaminantes a la atmósfera. En 1997, la IMO aprobó el Anexo VI del Convenio MARPOL 73/78, estableciendo límites en la emisión a la atmósfera de determinados gases contaminantes procedentes de los motores Diesel. En el año 2011, con la finalidad de lograr una reducción del consumo de combustible y la emisión de CO₂ durante las operaciones del buque, la OMI adoptó la Resolución MEPC.203(62) (IMO Resolution

MEPC.203(62), 2011), modificando el Anexo VI e incluyendo un nuevo capítulo sobre eficiencia energética en los buques. Posteriormente, aparecen nuevos conceptos normativos relacionados con la eficiencia energética en un buque, como el Índice de Eficiencia Energética de Diseño (EEDI), de cumplimiento obligatorio en buques de nueva construcción, y el Plan de Eficiencia Energética del buque (SEEMP) de cumplimiento obligatorio en buques construidos y de nueva construcción.

Dado que las emisiones del sector marítimo constituyen una constante preocupación por parte de las Autoridades con competencia Ambiental y en especial para el Ministerio del Medio Ambiente, y considerando que cualquier organización industrial con una política ambiental adecuada y responsable debe perseguir, cuantificar y establecer la magnitud de todos los impactos ambientales asociados a la actividad para poder establecer posteriormente estrategias de reducción, se ve en la necesidad de llevar a cabo en el territorio, un estudio que dé cuenta de las principales actividades marítimas, cuantifique las emisiones eligiendo para ello la metodología más adecuada y además, proponga estrategias sean operativas e incluso regulatorias factibles a fin del desarrollo de esta actividad de una manera sustentable y limpia para el territorio.

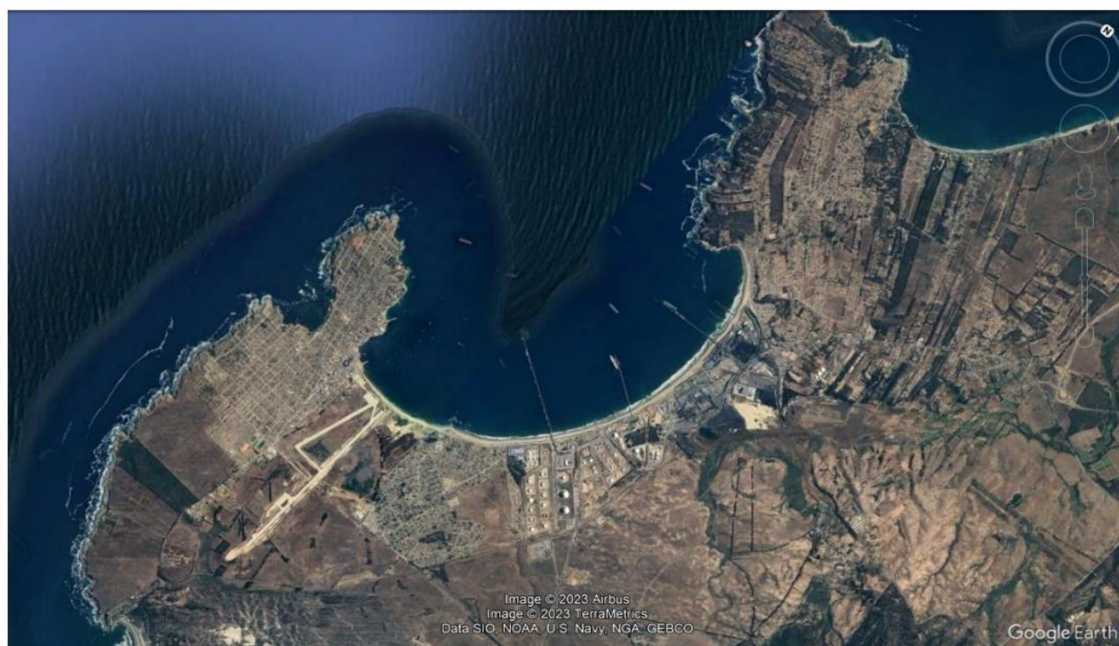


Figura 1.4 : Área del Puerto de Quintero y Puchuncaví. (Imagen cortesía de AMBIOSIS)

1.5 Soluciones de mitigación en el transporte naviero

1.5.1 Embarcaciones

Estas soluciones son aplicables para las embarcaciones que circulan en la costa y altamar, siendo esto los barcos remolcadores, de carga general, portacontenedores, RORO, de pasajeros, etc. Estas soluciones consideran en general los 3 modos de operación.

1.5.1.1 Gestión

Virtual management

La “llegada virtual” consiste en identificar retrasos en los puertos de descarga y luego gestionar el tiempo de llegada del buque a ese puerto mediante una velocidad de paso bien gestionada, lo que da como resultado una reducción de las emisiones de GEI. Al reducir la velocidad para lograr una hora de llegada mutuamente acordada, el buque puede evitar pasar tiempo fondeado esperando un atracadero, espacio para tanques o disponibilidad de carga. De esta forma se optimiza el periodo de hotelización de un buque y, por tanto, se podrían conseguir enormes reducciones de emisiones. Para implementar este plan con éxito, los puertos deben poder implementar sistemas de reserva previa y deben identificar y también rastrear todas las posibles causas de retrasos previos al atraque relacionados con el puerto (por ejemplo, disponibilidad de atraques, disponibilidad de equipos de manipulación de carga, etc.). Por lo tanto, la motivación de la gestión portuaria es muy esencial para lograr el máximo beneficio de este plan. (Misra et al., 2017)

El tiempo de respuesta reducido de un barco atracado le permite reducir la velocidad en el mar y seguir realizando la misma cantidad de trabajo de transporte anualmente. Se ha estimado que es posible lograr una mejora de hasta un 10%, y se ha demostrado que se puede lograr aproximadamente entre un 10% y un 20% dependiendo del tipo y tamaño del barco. Una mayor eficiencia portuaria se encuentra entre las medidas que tienen mayor potencial para reducir las emisiones de GEI, y también es una de las menos costosas. Los efectos de diferentes políticas de atraque en la reducción de la velocidad muestran que un cambio de una política de orden de llegada a un sistema con franjas horarias específicas reservadas previamente en los puertos reduciría el tiempo de espera de los buques.

Un estudio concluyó que simplemente reduciendo los tiempos de espera improductivos, en promedio, se podría reducir de 1 a 4 horas de tiempo en puerto para una compañía naviera a granel,

para los dos barcos incluidos en el estudio, esto correspondería a reducciones potenciales en el consumo de combustible del 2% al 8%. Además de tiempos de espera más cortos, los tiempos del buque en puerto pueden reducirse mediante actividades de carga y descarga más eficientes, es decir, mejoras de productividad. El tiempo de respuesta reducido para los barcos también le da al puerto el beneficio de un mayor rendimiento del atraque. (Wu et al., 2024)

Sistema de análisis meteorológico

En caso de mal tiempo el camino más corto no siempre es el más rápido ni el más eficaz, por lo que el objetivo fundamental de la navegación meteorológica es determinar el mejor rumbo para viajes de larga distancia. Esto se debe al hecho de que mantener la velocidad en tormentas o mal tiempo crea una resistencia adicional del viento y las olas, cuya cantidad depende de la gravedad y la dirección del tiempo en relación con el barco, a pesar de la posibilidad de causar daños. Esto resulta en un mayor uso de combustible. Alternativamente, si la velocidad disminuye debido a condiciones desfavorables, los tiempos de llegada previstos pueden aumentar, lo que afectará la disponibilidad de espacios de atraque. Por lo tanto, el concepto principal es analizar los datos actuales del pronóstico del tiempo y elegir la ruta óptima a través de un mar más tranquilo con la mayor cantidad de trayectorias a favor del viento utilizando técnicas de predicción y optimización. Estos enfoques se basan en la comprensión de la resistencia del barco en aguas tranquilas y en mares turbulentos. (Issa M et al., 2022)

Reducción de velocidad (slow steaming)

El consumo de combustible se puede reducir al disminuir la velocidad promedio de un barco, sin embargo el viaje dura más. La navegación lenta se ha convertido en un método comúnmente utilizado para reducir los costos del combustible porque los barcos marinos ahorran más combustible a bajas velocidades. Si bien existen muchas opciones de reducción de emisiones (como las velas tipo cometa), la navegación lenta puede ser una solución inmediata para que los transportistas disminuyan su impacto ambiental. Los beneficios de la navegación lenta dependen del tipo de barco, tonelaje, itinerarios y actividades. Como ya se ha mencionado, la navegación lenta alarga los viajes; no obstante, una disminución del 10% en la velocidad puede resultar en una reducción promedio total de las emisiones del 19%. Sin embargo, la “slow steaming”, debido a que funciona a carga parcial durante períodos prolongados, puede dañar potencialmente el motor. (Issa M et al., 2022)

Como la relación entre la velocidad del barco y el consumo de combustible por unidad de tiempo aumenta aproximadamente en relación cúbica, una pequeña reducción de la velocidad puede tener una gran influencia en el consumo de combustible. En general, la “slow steaming” es la medida de reducción de GEI que se espera que tenga el mayor potencial de ahorro. Sin embargo, se puede esperar que este potencial varíe significativamente entre los diferentes sectores de transporte marítimo y velocidades operativas. En un estudio realizado en la UE, se llegó a la conclusión de que a menudo es realista reducir hasta un 30% la necesidad de energía en trabajos de transporte constantes para barcos individuales. Con un trabajo de transporte constante, se puede lograr una velocidad reducida aumentando el número de barcos en la flota o reduciendo el tiempo de espera en el puerto. Sin embargo, existen limitaciones técnicas: los barcos están contruidos para operar eficazmente a la velocidad de diseño. Velocidades mucho más bajas pueden dar como resultado niveles más altos de contaminantes en los gases de escape y mayores costos de mantenimiento. Además, una velocidad reducida sólo reduce el consumo de combustible hasta un cierto punto, lo que se puede llamar la velocidad más eficiente desde el punto de vista energético. Por debajo de esta velocidad, el consumo de combustible aumenta por unidad transportada. Los problemas técnicos que surgen cuando se operan embarcaciones a velocidades inferiores a la velocidad de diseño se pueden superar ajustando los motores existentes. Los potenciales de reducción de emisiones de GEI provenientes de la navegación lenta dependen en gran medida de la longitud de canales. Por lo tanto, no es probable que incentivar la navegación lenta de los barcos en las zonas portuarias consiga reducciones significativas de emisiones, considerando las emisiones totales del viaje de un barco. Sin embargo, en relación con las emisiones de otras actividades en los puertos, se ha demostrado que una amplia adopción e implementación de velocidades reducidas en los canales de navegación puede lograr grandes reducciones. (Styhre L et al., 2017)

Diseño y condiciones de operación del barco

La optimización hidrodinámica es un método de diseño robusto y confiable que juega un papel importante en la optimización del casco. El enfoque de diseño robusto y confiable de optimización hidrodinámica es crucial para la mejora del casco. Una herramienta común para simulaciones hidrodinámicas de formas de casco claras y libres de suciedad es la dinámica de fluidos computacional (CFD). Según (Issa M et al., 2022) algunas de estas características de diseño y operación son:

Limpieza: Mantener el consumo de combustible previsto para el barco puede beneficiarse de una limpieza rutinaria del casco. Las algas, los mariscos y los mejillones son atraídos por las bacterias de

la superficie del casco, lo que aumenta el coeficiente de resistencia. Es importante recordar que la rugosidad superficial promedio del casco de un barco típico "crece 40 m/año", lo que se traduce en un aumento en la demanda de combustible del 1%.

Arco bulboso: El sistema de olas generado en la proa interactúa con el sistema de olas del barco generando resistencia, a causa de esto se ha diseñado la proa bulbosa, una extensión de la proa por debajo de la línea de flotación que forma una cresta delante del barco y mejora el flujo de agua alrededor del casco. Esto minimiza la resistencia de los buques grandes que navegan dentro de rangos de velocidad comerciales, lo que resulta en una reducción de hasta un 20% en el uso de combustible.

Aberturas de casco de perfil bajo: Las aberturas de los cofres marinos con aberturas de casco debajo del perfil pueden minimizar la resistencia y, por tanto, el uso de combustible al disminuir los impactos de la turbulencia de los túneles de las hélices de proa. Estos orificios se pueden diseñar y optimizar para reducir la demanda de energía hasta en un 5%.

Operación de lastre reducido: Las superficies del casco menos mojadas y la menor resistencia resultan de un desplazamiento más ligero. El lastre debe ser adecuado para mantener la estabilidad, el manejo y la inmersión de la hélice en la profundidad adecuada. La mayor reducción del consumo de combustible varía según el diseño, aunque puede llegar al 7%.

Diseño de hélice: La reducción de la resistencia del casco se puede lograr mediante: Gestión de la eficiencia de la hélice (1–2%), Tirando del propulsor (<10%), Operación de velocidad constante versus variable (<5%), Winglets en la punta de la hélice (<4%), Boquilla de hélice (<5%), Secciones avanzadas de palas de hélice (<2%), Propulsores de ala (<10%), Hélice contrarrotante (<12%) e Interacciones hélice-timón (<4%).

Sistema de recuperación de calor residual (WHRS): Aproximadamente la mitad de la energía se pierde debido a la irreversibilidad y al rechazo de calor para satisfacer la Segunda Ley de la Termodinámica. Sin embargo, el WHRS puede recuperar parte de esta energía de los gases de escape, lo que reduce las emisiones y el consumo de combustible. Las siguientes fuentes de generación potencial de energía son: (1) agua de camisa (5,2%), (2) enfriador de aire (16,5%) y (3) gases de escape (25,5%). El calor de los gases de escape se utiliza para impulsar turbinas de vapor que generan energía para la generación de energía auxiliar en un WHRS. Como resultado, los motores auxiliares ahorran combustible. Por lo tanto, WHRS es más adecuado para barcos que generan mucho de calor residual y consumen mucha energía. En la literatura se han informado varias estimaciones del

potencial de reducción de emisiones; por lo tanto, la OMI informa un potencial del 8 al 10%. Según otros estudios, es posible ahorrar entre un 4% y un 16% de combustible.

Placas de ajuste del interceptor: Una proyección submarina vertical en la parte trasera del casco llamada placa de ajuste interceptora dirige el flujo de alta presión detrás de las hélices hacia abajo, produciendo un efecto de elevación. Esta es una opción para barcos que se mueven a una velocidad razonable, incluidos RoRos y cruceros. Para un ferry normal, la mejora es del 4%, mientras que es del 1 al 5% para un aumento menor en la eficiencia del combustible.

“Peak Shaving”: La propulsión diésel-eléctrica es una opción viable para embarcaciones que deben navegar en zonas sensibles o con prudencia en el agua (como en vías navegables urbanas o a diversas velocidades). Tanto los barcos que proporcionan conexiones fluviales o marítimas rápidas como los barcos con sistemas de posicionamiento dinámico pueden utilizar energía eléctrica diésel. La eficiencia energética se puede aumentar considerablemente utilizando un sistema de propulsión eléctrica diésel junto con un sistema de batería, esto es posible mediante un método llamado Peak Shaving. Este método permite absorber los picos de carga mientras se libera la potencia necesaria según sea el caso, esto permite manejar picos de carga que son muy cambiantes sin emitir contaminantes como dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x). Se recomienda instalar un sistema de almacenamiento de energía que genere energía durante períodos extremadamente breves, para así evitar el uso de los motores diésel. Los costos de combustible, operación y mantenimiento también disminuyen cuando se reduce la capacidad instalada. Un barco debería esperar ahorrar hasta un 20% en el uso de combustible.

1.5.1.2 Combustibles alternativos

LNG

En estos últimos años los puertos están desarrollando nueva infraestructura de abastecimiento de GNL, un biocombustible. Esto parece ser un desarrollo natural para aquellos puertos que ya operan en el comercio de GNL, aunque las operaciones de abastecimiento de combustible también plantean desafíos, principalmente relacionados con la distribución de GNL, la infraestructura y la ubicación de las instalaciones de abastecimiento. El uso de GNL ofrece ventajas en términos de reducción de emisiones de gases nocivos, ya que elimina por completo las emisiones de SO_x y PM, y elimina sustancialmente los NO_x (aunque el CO₂ sólo se reduce parcialmente). También permite que el puerto se beneficie de precios del gas sustancialmente más bajos, aunque el precio del GNL hoy está

lejos de ser estable y es muy difícil de predecir. Con la aplicación de regulaciones de emisiones más estrictas en el Mar del Norte, el Mar Báltico y la costa de los EE. UU. , el GNL podría convertirse en un importante combustible para el transporte marítimo en la próxima década, lo que requeriría que los puertos del norte de Europa y los EE.UU desarrollen instalaciones adecuadas. De hecho, el GNL parece particularmente atractivo en los segmentos de ferry y de pasajeros, que normalmente requieren que los buques atraquen en las proximidades de los centros urbanos, aunque ha habido una tendencia a trasladar las plantas de licuefacción y regasificación de GNL lejos de las zonas pobladas, este es sólo una de varias limitaciones impuestas a la explotación de nuevas fuentes de energía en la ciudad. (Acciaro M et al., 2014)

El gas natural licuado se adopta cada vez más como combustible marítimo, también para buques distintos de los transportadores de GNL. La solución técnica suele incluir un motor de combustible dual que puede funcionar con GNL o con fueloil, y que siempre utiliza una pequeña cantidad de fueloil para el encendido cuando se utiliza GNL. Los buques de línea regular y los buques de regiones con una infraestructura establecida para el GNL adoptarán más fácilmente el GNL como combustible. Un cambio de fueloil marino a GNL conduce a una reducción significativa de las emisiones de NOx, SO2 y material particulado. Las emisiones de CO2 son aproximadamente un 25% menores en comparación con los fuelóleos, pero las emisiones totales de equivalentes de CO2 no favorecen necesariamente al GNL como combustible marino, ya que un pequeño porcentaje del metano del combustible pasa por el proceso de combustión sin quemarse. El metano es un potente GEI; 72 veces más potente que el CO2 en una perspectiva de 20 años y 25 veces más potente en una perspectiva de 100 años. Las diferencias para los dos horizontes temporales se deben a diferencias en los tiempos de residencia y la reactividad del CH4 y CO2 en la atmósfera. (Winnies H et al., 2015)

Metanol

El metanol es otro tipo de biocombustible que, al igual que el GNL, se puede utilizar en motores marinos de combustible dual. El metanol se encuentra en un estado más temprano de introducción en el mercado, pero ya se han iniciado pruebas a gran escala: el armador sueco Stena Line reemplaza gradualmente todos los motores convencionales a bordo del ferry Stena Germanica de RoPax por motores de metanol. El metanol es más fácil de almacenar y distribuir que el GNL ya que es un líquido a temperatura ambiente. La producción y combustión de metanol causa menores emisiones de equivalentes de CO2 (por unidad de energía del combustible) que el combustible GNL en un horizonte temporal de 100 años, pero su desempeño es peor que el GNL en un horizonte temporal de 20 años. El potencial de calentamiento por unidad de energía quemada de metanol es

muy similar al de los combustibles marinos convencionales de una perspectiva del ciclo de vida. (Winnies H et al., 2015)

Otros Biocombustibles

Es difícil decir si en el futuro los biocombustibles adquirirán una importancia más notoria entre los combustibles marítimos. A pesar de las ventajas que estos puedan traer no son un tema destacado en las publicaciones y, además de las descripciones del Bio Puerto de Rotterdam, apenas hay relatos de experiencias con biocombustibles en los puertos. Una razón podría ser la disponibilidad limitada de biocombustibles para el sector del transporte. (Bjerkan K et al., 2019)

Amoníaco

El amoníaco es uno de los combustibles alternativos más prometedores para los buques marinos en los últimos tiempos, el amoníaco está compuesto de dos elementos, nitrógeno e hidrógeno, sin carbono ni azufre. En 2018, MAN B&W, un fabricante de motores diésel marinos, anunció que su motor alimentado con gas licuado de petróleo funcionará inyectando amoníaco en el motor ME-LGIP dentro de 2 a 3 años. Además, se puede producir amoníaco a partir de combustibles fósiles y energías limpias, como la eólica y la solar, para utilizarlo como energía limpia. La primera ventaja para las futuras fuentes de energía es que emiten la menor cantidad posible de gases de efecto invernadero que aceleran el calentamiento global. (Wu et al., 2023)

Por lo tanto, el amoníaco verde ciertamente califica como una fuente de energía del futuro. Además, en comparación con el hidrógeno, es fácil, barato y económico de producir, almacenar y transportar. En comparación con la gasolina, la posibilidad de explosión es menor, por lo que una fuente de energía relativamente segura ha atraído una gran atención de la comunidad internacional. Actualmente, alrededor del 80% del consumo de amoníaco se utiliza en fertilizantes como nitrato de amonio, urea y fosfato de amonio para mejorar la producción de cultivos, y el resto del amoníaco se utiliza en el cuidado de la salud, explosivos, cosméticos y electrónica. La densidad energética del amoníaco es superior a la de la gasolina y el metanol: alto octanaje, fácil de comprimir y licuar, seguro y cómodo de almacenar y transportar. En comparación con la gasolina, el amoníaco tiene un poder calorífico ligeramente menor pero un octanaje más alto. Al aumentar la relación de compresión, la eficiencia térmica del motor se puede aumentar a más del 50%, aproximadamente el doble que la de

un motor de gasolina convencional. Además, debido a que el amoníaco líquido absorbe calor a medida que se evapora, los barcos alimentados con amoníaco líquido pueden tener aire acondicionado casi gratis. En lo que respecta al reabastecimiento, la infraestructura de las gasolineras existentes puede satisfacer la demanda de reabastecimiento de amoníaco líquido, y el amoníaco sintético es uno de los productos químicos más producidos en el mundo. Los procesos de producción, almacenamiento, transporte y entrega están maduros y el equipo existente es adecuado. Sin embargo, el amoníaco aún no se ha comercializado como tecnología de propulsión en el transporte marítimo. En los últimos años, muchas empresas ya han iniciado el uso de amoníaco líquido en una configuración de combustible dual, como la Oficina Estadounidense de Transporte Marítimo y el Instituto de Investigación y Diseño de Buques Mercantes de Shanghai habían desarrollado el combustible de amoníaco en el buque portacontenedores alimentador que utiliza un motor de combustible dual. Se estima que el sistema de propulsión con combustible amoníaco tiene entre un 2% y un 60% de coste mejora respecto a los buques tradicionales. Mientras tanto, la Oficina Estadounidense de Transporte Marítimo y el Instituto de Investigación y Diseño de Buques Mercantes de Shanghai reconocieron que reemplazar los buques costa afuera con celdas de combustible de amoníaco es un enfoque factible, que requiere una inversión adicional del 8 al 300% debido a las tremendas incertidumbres en los requisitos de las celdas. (Wu et al., 2023)

Hidrogeno

El hidrógeno, como fuente de energía renovable más prometedora, tiene numerosos campos de investigación debido a su nula contaminación durante la combustión. El Programa de Energía de las Naciones Unidas ha identificado al hidrógeno como el futuro del sector del transporte. El mejor método para producir hidrógeno es el llamado hidrógeno verde, mediante electrólisis, convirtiendo el agua en hidrógeno y oxígeno, el hidrógeno verde es el único método sin producción de carbono para formar hidrógeno. Mientras tanto, la electricidad durante el proceso de electrólisis puede utilizar energía renovable (energía eólica o solar), las tecnologías de electrólisis se han utilizado comercialmente, pero los costos del hidrógeno verde son considerablemente más altos que los del hidrógeno gris y azul, lo que es la razón principal que limita su desarrollo. La solución predominante es utilizar energía renovable para generar hidrógeno verde, pero todavía queda un largo camino por recorrer. Otro aspecto esencial es el almacenamiento de hidrógeno, el método más desarrollado y utilizado es comprimir hidrógeno. Por lo general, el hidrógeno se comprime de 10 a 20 MPa a 70 MPa para aumentar la densidad del hidrógeno. Aparte de esto, el hidrógeno se puede convertir en líquido a una temperatura baja, aproximadamente 21 K, en la que la densidad del hidrógeno

aumentará a 70,8 kg m⁻³, aproximadamente 775 veces en comparación con las condiciones ambientales. Además, el hidrógeno se puede almacenar mediante métodos químicos, como metales, aleaciones y otras sustancias químicas. En comparación con la densidad energética de los combustibles tradicionales (36,3 MJ L⁻¹), la densidad energética del hidrógeno líquido es relativamente baja, de sólo 8,5 MJ L⁻¹. Incluso sin considerar el espesor del material aislante, la demanda de tanques de almacenamiento es más de cuatro veces mayor que la de los combustibles fósiles. Aunque el hidrógeno se considera la mejor opción en los buques marítimos, aún es necesario superar muchos inconvenientes vitales. Las energías renovables son una tecnología esencial para acceder al hidrógeno, pero los costos del hidrógeno son demasiado altos y no han alcanzado un nivel tecnológico maduro. Además, el complicado sistema de almacenamiento es otro obstáculo para obtener hidrógeno altamente eficiente. (Wu et al., 2023)

Amoníaco-Hidrogeno

El combustible de amoníaco-hidrógeno es otra área de investigación. Uno de estos métodos consiste en agregar una pequeña cantidad de hidrógeno al combustible de amoníaco, lo que se ha descubierto que acelera eficazmente la combustión, haciendo que el motor funcione de manera más eficiente, especialmente en los motores de encendido por chispa. Cuando el contenido de hidrógeno del combustible es del 10%, el índice de octanaje de la mezcla amoníaco/hidrógeno es mayor, y la relación de compresión aumentará aún más para compensar la dilución de entrada, aumentando la eficiencia y la presión adecuada. Otro método, el amoníaco con alto contenido de hidrógeno, se considera una mejor solución, ya que el amoníaco se puede almacenar como portador de hidrógeno. La ventaja es que el amoníaco se convierte fácilmente en hidrógeno. En segundo lugar, el amoníaco se puede quemar u oxidar de forma respetuosa con el medio ambiente. Luego se puede sintetizar amoníaco sin utilizar combustibles fósiles como materia prima. Una mezcla de amoníaco e hidrógeno de 70-30% en volumen es mucho más estable que otras condiciones. Un alto contenido de hidrógeno (alrededor del 30 %) provoca retrocesos, mientras que una mezcla con alto contenido de amoníaco (<30 %) produce condiciones de purga pobre en una proporción de equivalente. El NH₃ se caracteriza por una velocidad de combustión laminar lenta, se puede obtener un aumento significativo en la velocidad de la llama laminar con H₂ mezclado con NH₃ y aire. La aceleración de la velocidad laminar de la llama aumenta exponencialmente con H₂. En condiciones ricas en combustible, cuando la temperatura de entrada de la mezcla es <1075 K, la emisión de NO_x de la mezcla NH₃-H₂ es ligeramente superior al contenido de H₂, que es proporcional al contenido de H₂, mientras que la

tendencia es opuesta cuando la temperatura de entrada de la mezcla es mayor. A temperaturas medias y bajas, la adición de H₂ apenas mejora la reactividad del sistema. Sin embargo, en comparación con otros métodos de almacenamiento directo de hidrógeno, el uso de amoníaco como potencial portador de hidrógeno todavía recibe una atención limitada. La investigación se centra principalmente en el uso de hidrocarburos ligeros y metanol como vehículos, pero el amoníaco es sin duda más adecuado para la investigación de reducción de emisiones que de carbono. (Wu et al., 2023)

Diesel más limpios

Hay disponibles varias opciones de combustibles más limpios que son compatibles con los motores diésel existentes, incluido el diésel con bajo contenido de azufre (15 ppm de azufre), las emulsiones diésel, el biodiésel y el diésel Fischer-Tropsch. Aunque el diésel bajo en azufre es el más disponible y el más barato, las otras opciones ofrecen mayores reducciones de emisiones para ciertos contaminantes. El diésel con bajo contenido de azufre generalmente está destinado a usarse en combinación con controles de emisiones, pero ofrece reducciones sustanciales de emisiones incluso cuando se utiliza solo como sustituto del combustible para buques. Muchos puertos en todo el mundo se han comprometido a utilizar diésel con bajo contenido de azufre en diversas operaciones para reducir la contaminación por escape de diésel. El Puerto de Helsinki utiliza diésel con bajo contenido de azufre (30 ppm) en sus propios equipos y en varios buques marítimos, como ejemplo para los operadores de la terminal. En los Estados Unidos, el puerto de Oakland ha convencido a la mayoría de los operadores de sus terminales para que adopten diésel con bajo contenido de azufre (15 ppm) para los equipos de manipulación de carga. Las emulsiones de diésel (diésel acuoso) se pueden utilizar como herramienta de reducción de emisiones en los puertos. La Junta de Recursos del Aire de California (ARB) ha verificado tres marcas de diésel acuoso, aunque sólo hay una ligera disminución de NO_x, algunos estudios han informado disminuciones significativas de PM con el uso de este combustible, mientras que otros, concretamente en equipos todoterreno, no han mostrado resultados tan impresionantes. Hay proyectos de demostración implementados o pendientes en los puertos de Houston, Los Ángeles, Long Beach y Oakland. El biodiesel se vende más comúnmente como una mezcla con 80% o más de diesel convencional. Los beneficios en materia de emisiones de estas mezclas muestran una mejora del 10 al 20% con respecto al diésel normal. El biodiesel puro ofrece reducciones más sustanciales de PM y CO₂ (del orden del 50%) pero a expensas de un aumento de NO_x (hasta de 10%). Muchos fabricantes de motores no garantizan el uso de sus productos con biodiesel puro, porque puede causar corrosión en algunos motores. El biodiesel se distribuye en muchas regiones de los Estados Unidos, aunque los precios varían ampliamente, al igual que la

materia prima utilizada para producir combustible biodiesel, que puede incluir aceites y grasas usadas, o productos agrícolas como el maíz. La capacidad de biodegradación del biodiesel lo hace muy adecuado para usos marinos porque los derrames no son un problema grave. El diésel Fischer-Tropsch generalmente se elabora a partir de carbón, pero a veces se elabora a partir de gas natural, lo que dio lugar al reciente acrónimo Gas to liquids fuel (GTL). Gran parte del diésel Fischer-Tropsch en los Estados Unidos se importa de Malasia. El combustible Fischer-Tropsch puede reducir las emisiones de NOx en más del 10% y de varios otros contaminantes en el rango del 30%. Los costos y beneficios ambientales generales dependen del transporte y las materias primas y aún no se conocen bien. (Bailey D et al., 2004)

El biodiesel tiene propiedades solventes más fuertes que el diesel. Una transición al biodiesel puro requiere mantenimiento que incluye cambios frecuentes del filtro de combustible inicialmente y el reemplazo de todas las piezas de caucho (generalmente utilizadas en vehículos más antiguos a diferencia de los materiales sintéticos modernos como Viton). (Bailey D et al., 2004)

Combustible emulsionado

El combustible emulsionado se basa en agregar agua al combustible para reducir la temperatura en la cámara de combustión. El combustible emulsionado permite una mejor atomización y dispersión del combustible dentro de la cámara de combustión, dando como resultado una combustión completa. El combustible emulsionado tiene la ventaja de reducir las emisiones de óxido de nitrógeno y material particulado. Sin embargo, también provoca la corrosión de los componentes del motor y la aparición a corto plazo de fenómenos de separación de aceite y agua. (Issa M et al., 2022)

Sistemas híbridos

El transporte por carretera está liderando la transición hacia la descarbonización. Hay muchas vías posibles para lograr este objetivo, incluidas estrategias como mejoras de la aerodinámica, mejoras de la eficiencia de la propulsión, recuperación del calor residual, combustibles y fuentes de energía alternativos (hidrógeno, biocombustibles, etc.), hibridación de trenes motrices y electrificación, entre muchos otros. Se demostró que la electrificación del transporte de mercancías por carretera es factible en los países desarrollados. Aunque la electrificación del sistema de transporte enfrenta sin duda serios desafíos, las tecnologías actualmente disponibles son maduras (por ejemplo, vehículos híbridos y eléctricos), y los avances en la electrificación del transporte por carretera están atrayendo la atención en otros sectores, como el transporte marítimo. La hibridación,

por ejemplo, se considera un paso viable y transitorio hacia la electrificación del sistema de propulsión, con un potencial significativo para el ahorro de energía en los barcos. Los sistemas de propulsión híbridos permiten operar los motores de combustión dentro de puntos de operación de alta eficiencia (evitando puntos de operación de baja eficiencia mediante el uso de la batería), lo que resulta en un ahorro de energía, dependiendo de las características del ciclo de conducción y del tipo de barco (por ejemplo, un rango de reducción del consumo de energía del 9% al 13% en el caso de buques de transporte interior y una reducción del consumo de combustible del 2,91% al 7,48% en ferries RORO de corta distancia). La hibridación de buques requiere del diseño adecuado de sistemas integrados de energía eléctrica, que a su vez, requieren la presencia de complejos sistemas de control. Las pruebas de simulación y hardware-in-the-loop permiten evaluar cómo responde el sistema a las perturbaciones, así como su integración funcional. (Torreglosa J et al., 2022)

Se pueden utilizar baterías, volantes de inercia y supercondensadores como almacenamiento de energía para la propulsión eléctrica sin emisiones de carbono. Los motores eléctricos pueden proporcionar propulsión; sin embargo, cuando se combina con el peso de las baterías y el almacenamiento en los buques, puede ser una opción demasiado cara. En varios escenarios se evaluó los barcos eléctricos en comparación con otros combustibles como el hidrógeno, el amoníaco y los biocombustibles y se concluyó que los barcos eléctricos son la tecnología ligeramente más ventajosa. (Issa M et al., 2022)

La tecnología de baterías para automóviles eléctricos está bajando rápidamente de precio, lo que sugiere que esta tecnología puede “convertirse en una opción más factible y fácilmente disponible también para otros sectores del transporte, como el transporte marítimo”. El costo anual promedio para el período 2017-2020 fue de \$137/céntimos por kilovatio hora, cifra inferior a lo previsto. Los precios de los bancos de baterías de iones de litio alcanzarán los 73 dólares por centavo por kilovatio hora en 2030. En las diferentes vías de transición, las baterías desempeñan un papel mínimo como principal de almacenaje o fuente de energía a bordo de los buques dados sus altos costos y su baja densidad volumétrica de energía. De hecho, el costo de las baterías (coste del sistema de almacenamiento) parece prohibitivo en comparación con otras opciones de cero emisiones de carbono en la mayoría de las situaciones. El Zerocat 120, un barco de 120 coches con capacidad para hasta 360 pasajeros para excursiones breves (20 min), es el primer barco propulsado por baterías de litio del mundo, tiene un tiempo de carga de batería muy rápido. (Issa M et al., 2022)

1.5.1.3 Tecnología

Sistemas de abatimiento y mitigación

Los dispositivos de control de la contaminación (o llamadas también fin de chimenea) tiene como objetivo eliminar la contaminación al final del proceso, de manera de evitar que los compuestos contaminantes salgan a la atmosfera. La tecnología de control de la contaminación por lo general implica quemar, reciclar, filtrar y catalizar contaminantes. Las tecnologías típicas de control de la contaminación incluyen electrofiltros, filtros de mangas, depuradores (secos y húmedos), sistemas SNCR o SCR. (Bailey D et al., 2004)

----Depurador de S

Los depuradores son la tecnología más prometedora para proporcionar soluciones de emisiones de SOx y PM que cumplan con los requisitos de la OMI. Los depuradores húmedos son la tecnología más común en la actualidad. También existen sistemas híbridos de depuración acuosa, que combinan sistemas de circuito abierto y de circuito cerrado. Por último, están disponibles depuradores de gases de combustión secos. Estos métodos pueden ayudar a reducir las emisiones de SOx y PM en un 95% para partículas de más de 5 µm y hasta un 80% para partículas de 3 a µm. Son, no obstante, instalaciones intrincadas, pesadas y sustanciales. (Issa M et al., 2022)

---- Reducción Catalítica Selectiva (SCR)

En Europa se ha trabajado mucho para explorar los controles de emisiones para los barcos. La reducción catalítica selectiva (SCR), una tecnología de control que reduce drásticamente los NOx formadores de smog proveniente de las chimeneas de los barcos, se ha instalado en más de 100 grandes barcos, principalmente en la zona del Mar Báltico. También existen varios ejemplos estadounidenses. En California, cuatro grandes buques oceánicos y una draga "Cutterhead" utilizan sistemas SCR. Si bien esta tecnología todavía tiene varios obstáculos que superar, incluido el costo, eventualmente puede resultar una medida eficaz de control de la contaminación para su uso generalizado. (Bailey D et al., 2004)

En comparación con otras tecnologías de eliminación de NOx, los sistemas SCR ofrecen la mayor eficacia de eliminación de NOx. A los gases de escape se les añade un reductor (normalmente amoníaco mediante la inyección de urea acuosa) y los NOx se reducen a nitrógeno (N2) con la ayuda

de un catalizador. La tecnología SCR es la tecnología más prometedora para cumplir las restricciones de nivel III de NO_x de la OMI. (Issa M et al., 2022)

----Inyección directa de agua (DWI)

Con DWI, el agua se alimenta inmediatamente al cilindro de combustión, lo que resulta en una alta reducción de NO_x de hasta un 50% a medida que se reducen las temperaturas máximas. DWI consume menos agua que otros procesos como la humidificación y el agua en emulsiones de combustible, y la calidad del agua es una preocupación menor. Sin embargo, este método consume más combustible y produce más humo, especialmente con cargas bajas. (Issa M et al., 2022)

----Ciclo Miller y enfriamiento por aire de barrido

El ciclo Miller es un ciclo en frío que reduce las emisiones de NO_x hasta entre un 40% y un 60% al tiempo que aumenta la eficiencia del motor. El ciclo Miller también puede cumplir con una temperatura baja del aire de barrido en motores diésel marinos de cuatro tiempos. Las temperaturas de combustión y los NO_x se minimizan reduciendo la temperatura del aire de barrido. El óxido de nitrógeno disminuye aproximadamente un 1% por cada reducción de 3 °C. La tecnología interna del motor, como la recirculación de gases de escape (EGR), también da como resultado temperaturas de combustión más bajas y una composición de NO_x más baja. Se considera la tecnología más importante para reducir los NO_x de los motores diésel. (Issa M et al., 2022)

----Recirculación de gases de escape (EGR)

La recirculación de gases de escape (EGR) reduce las emisiones de NO_x al devolver los gases de escape al cilindro de combustión. Debido a su alta capacidad calorífica específica, los gases de escape reducen las temperaturas máximas, lo que reduce las emisiones de NO_x. El menor nivel de O₂ en el motor también provoca una reducción de la temperatura. En comparación con un motor diésel típico, la EGR puede reducir los NO_x hasta en un 50%. El EGR utilizado junto con depuradores puede reducir las emisiones de SO_x y PM al mismo tiempo que protege el enfriador del EGR contra obstrucciones. Sin embargo, con el aumento del consumo de combustible, la EGR puede generar dificultades y costes de instalación. Además, la EGR produce efluentes, lo que debe tenerse en cuenta al construir dicho sistema. (Issa M et al., 2022)

----Plasma no térmico (NTP)

Los gases de escape se ionizan con ayuda de electricidad en el NTP después del tratamiento. Los electrones muy potentes del plasma convierten el oxígeno en radicales de oxígeno. Posteriormente, los radicales de oxígeno reaccionan con el NO, dando como resultado la formación de NO₂. El NO₂ se transforma en N₂ con la ayuda de un catalizador. Es fundamental recordar que el plasma puede producirse mediante una descarga electrostática o un haz de electrones. El NTP puede reducir las emisiones de NO_x y SO_x de los motores marinos en un 60% y un 80%, respectivamente. (Issa M et al., 2022)

Energía Eólica

La energía eólica es la primera fuente de energía utilizada para propulsar un velero; la diferencia es que antiguamente la energía eólica se utilizaba directamente para mover un barco, mientras que ahora la energía eólica se convierte en energía eléctrica con aerogeneradores. Hay dos tipos principales de turbinas eólicas modernas, las turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT) y las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT). Las HAWT se utilizan ampliamente para generar electricidad en tierra debido a su mayor producción de energía, pero para las turbinas utilizadas en barcos, las VAWT son más adecuadas. La turbina horizontal provocará una mayor resistencia, reduciendo la velocidad del barco. Un ejemplo de este uso es el E-Ship, este buque utiliza un rotor vertical más plano basándose en el efecto Magnus para generar 6,3 MW de electricidad. El concepto de velero también se desarrolló, por ejemplo, en el barco de aves oceánicas. El mayor desafío de los veleros que utilizan energía eólica es la eficiencia de su velocidad y su autonomía de crucero. La posible contramedida de CO₂ de los barcos propulsados por energía eólica es del 1 al 50 %. (Tuswan et al., 2022)

Solar Sailor es el primer catamarán turístico del mundo con capacidad para 100 personas impulsado por energía solar y eólica para operaciones comerciales en el puerto de Sydney. Este barco tiene alas solares únicas que pueden dirigir los paneles fotovoltaicos hacia el sol. La embarcación es silenciosa, tiene un bajo lavado y no emite contaminación del agua en ningún modo de operación. El ala de la NASA que incorpora los colectores solares están diseñados para soportar 40 nudos de viento. Se estima que se ahorrarán unos 250.000 litros de combustible diésel y se reducirán las emisiones anuales de GEI en 670 toneladas. Se ha desarrollado un concepto radical, el superyate de ala rígida de 58 m, llamado Soliloquy Super yate verde que utiliza energía eólica, solar y tecnología Hybrid Marine Power (HMP) de Solar Sailor Holdings Ltd. El barco está equipado con 600 m² rígidos. -alas de vela solar que giran independientemente 360 grados. Según la empresa británica de compensación de carbono para yates, un superyate de tamaño equivalente consume entre 250 y 600 galones de diésel

marino por hora, dependiendo de la velocidad y la eficiencia del combustible, y libera tres veces menos cantidad de CO₂. (Tuswan et al., 2022)



Figura 1.5 : Barco Híbrido SOLAR SAILOR. (Extraída de www.solarnavigator.net)

Energía Solar

Según la información recopilada de (Tuswan et al., 2022) se tiene:

La energía solar es una fuente de energía barata, abundante y de bajo riesgo. Se afirmó que el 30% (unos 1015 W) de la energía solar total que ilumina la Tierra se refleja en el espacio. Este valor es mayor que la energía total producida por el hombre (petróleo, gas, carbón, energía nuclear, hidráulica, etc.). La energía de la luz solar se genera a partir de la “generación de energía fotovoltaica”. El efecto fotovoltaico fue reconocido por primera vez en 1839 por físicos franceses. Hay dos modos de funcionamiento principales para los sistemas de generación fotovoltaica: modos autónomos y conectados a la red. Un sistema de generación fotovoltaica autónomo es el sistema de generación fotovoltaica más sencillo, que no está conectado al sistema desde otras fuentes de energía. En pocas palabras, este sistema se puede realizar con un módulo fotovoltaico, una batería como acumulador de energía y una carga. Las baterías utilizadas deben tener capacidad suficiente para almacenar la energía generada por los paneles solares durante el día para su uso nocturno y en condiciones climáticas adversas. Mientras que los sistemas de generación fotovoltaica conectados a la red son más complejos, este sistema se puede aplicar a barcos que utilizan varias fuentes de energía, como combustible y paneles solares, para generar electricidad. Se conectan a la red a través de un inversor y no requieren baterías porque la red puede recibir toda la electricidad que un generador fotovoltaico puede suministrar. Ya hay muchos barcos pequeños totalmente propulsados por energía

solar que se han producido y comercializado en masa; algunos ejemplos son EcoCat EcoBoat (18 m de eslora) del Astillero Naval Metaltec y SunCRZ 22 de Navgathi. Estos barcos son 100% cero emisiones de GEI y 0% de combustible. Sin embargo, es muy ineficiente cuando funciona con energía solar para barcos más grandes, especialmente para uso comercial. Se ha estimado que el potencial global de reducción de las emisiones de CO₂ del barco asistido por energía solar es del 0,2 al 12 %.

----Barcos totalmente propulsados por energía solar

El Turanor planet solar se ha convertido en el mayor buque totalmente propulsado por energía solar (desplazamiento de hasta 85 t.), fue diseñado por LOMOcean Design. Esta embarcación está sostenida por un panel solar de 537m² y batería de iones de litio capaz de suministrar una potencia máxima de motor de hasta 120 kW y tres días de éxito mundial en el automóvil sin luz solar. Los buques totalmente propulsados por energía solar tienen la capacidad de producir cero emisiones y usar cero combustible. La energía solar en los barcos es muy prometedora, pero el cómo instalar más paneles fotovoltaicos en un espacio restringido en la cubierta del barco para aumentar la capacidad instalada del sistema de generación fotovoltaica sigue siendo un desafío. Por culpa de las pobres conversiones de energía de los paneles fotovoltaicos, incluso en lugares con abundante radiación solar, no es posible conectar un sistema de generación fotovoltaica directamente a la red principal del barco. Por otro lado, los sistemas de generación fotovoltaica independientes acoplados a una unidad de propulsión eléctrica pueden ofrecer la perspectiva de un desarrollo generalizado de sistemas basados en energía solar para barcos de pequeña escala. La energía solar podría emplearse como fuente de energía primaria en barcos de pequeña escala impulsados por energía solar, lo que brindaría una opción verdaderamente ecológica.

Los barcos totalmente solares producidos y operados son en su mayoría embarcaciones de paso. Las dimensiones medias de un barco íntegramente propulsado por energía solar son de aproximadamente 18,7 m × 6,3 m. El área efectiva para un sistema de generación fotovoltaica es de 84,6 m², con una potencia nominal de 16,6 kWp. y una capacidad de batería de 197 kWh.

----Energía asistida por energía solar en embarcaciones a gran escala

Varios buques de gran tamaño han utilizado tecnología fotovoltaica. La instalación de generadores fotovoltaicos a bordo a gran escala se puede integrar en la red del sistema de propulsión eléctrica del barco para reducir el consumo de combustible, es probable que esto genere nuevos

diseños de barcos importantes en el futuro. El autor ha recopilado datos de diversas fuentes sobre embarcaciones asistidas por energía solar que se han producido o aún están en etapa de desarrollo.

Algunos barcos utilizan tecnología de generación de energía asistida por energía solar, el hecho es que la aplicación de la generación de energía asistida por energía solar todavía se aplica ampliamente a buques con una gran superficie de cubierta superior. El uso de la energía solar se destina principalmente a fines eléctricos y de iluminación. Se ha demostrado que la generación de energía asistida por energía solar reduce el combustible consumo y emisiones de GEI en buques de gran escala con una reducción potencial de CO₂ de hasta un 0,2 – 12 %. La instalación de buques de gran escala con energía solar asistida puede reducir 8 toneladas de combustible/día o 2400 toneladas/año suponiendo que el barco esté activo durante 50 a 52 semanas por año, esto no solo es bueno para el medio ambiente sino que también puede reducir los costos de consumo de combustible. Si el barco se opera durante 20 años, puede reducir el costo de 100 millones de dólares o unos 5 millones de dólares al año, lo que es una muy buena inversión.

----Aplicación en barcos de energía solar integrados con nuevos recursos energéticos

También se han producido avances importantes en los barcos de propulsión de energía híbrida. El uso de energía procedente de más de una fuente pretende complementar las demás deficiencias energéticas. Por ejemplo, la energía solar y eólica no se utiliza habitualmente debido a su inestabilidad y dependencia de las condiciones climáticas. Este problema se puede superar parcialmente combinando la energía solar y eólica para crear un sistema híbrido de energía para barcos. A continuación se relatan algunos modelos de barcos con energía solar y eólica.

Por ejemplo, el futuro diseño del barco súper ecológico que está diseñado por Keiko Kosugi, quien ganó el Premio al Buen Diseño de Japón. El excelente barco ecológico 2030 de 800 TEU NYK está propulsado por una planta de energía de 44000 kW combinada de GNL, energía eólica y solar con 31000 metros cuadrados. Se estima lograr una reducción del 70% de las emisiones de GEI.

Otro caso es el Eoseas Concept Cruise (105000 toneladas) que es un diseño conceptual desarrollado por STX Europe en colaboración con Stirling Design International (SDI), el buque cuenta con cuatro grupos de generadores diesel-eléctricos de GNL dual para su propulsión, paneles fotovoltaicos de 8.300 m² con una potencia máxima de 108 MW y un innovador concepto de vela patentado por STX France, se afirma que este concepto de diseño tiene el potencial de reducir el

consumo de energía en un 50%, las emisiones de CO₂ en un 50%, el SO₂ en un 100%, los NO_x en un 90% y las cenizas en un 100%.

El Hornblower Hybrid es la primera clase de ferry multicasco con propulsión híbrida en los Estados Unidos operado por Hornblower Cruises en San Francisco y Nueva York. Los motores híbridos utilizan energía solar, eólica, diésel o una combinación de las tres para generar electricidad. También puede funcionar con una pila de combustible de hidrógeno, lo que lo convierte en el primer ferry de hidrógeno. El sistema de propulsión permite al capitán controlar los requisitos energéticos del buque y elegir las fuentes de energía más adecuadas.

Finalmente, entre estas propuestas, destaca la del E/S Orcelle, que pretende construir el primer buque cero emisiones del mundo. El crucero diseñado por Wallenius Wilhelmsen Logistics utilizará la energía eólica, solar y de las olas como fuentes de energía. El diseño conceptual del Orcelle comenzó en 2004 con un casco pentamarán con una capacidad de 13.000 toneladas. Orcelle utiliza tres velas rígidas, cada una de 1.400 m², fabricadas con material compuesto, que pueden girarse y posicionarse para captar el viento. Además, esta pantalla incluirá 800 m² de paneles fotovoltaicos para generar un máximo de 2.500 kW de electricidad solar, cuando no se utilizaban para propulsión, las velas se plegaban hacia la cubierta superior del barco para maximizar la cantidad de energía solar que recibían. Se pueden encontrar más componentes de generación de energía debajo del barco, en el casco principal hay 12 aletas horizontales que están diseñadas para moverse hacia arriba y hacia abajo a medida que el barco se mueve por el agua, con un motor hidráulico convirtiendo el movimiento en potencia.

Los barcos híbridos propulsados por energía solar son una solución a largo plazo para superar la dependencia de los barcos del consumo de combustible de carbono. Aunque la mayoría de los barcos de este tipo todavía se encuentran en la fase de diseño conceptual, importantes avances de varias empresas demuestran que los barcos híbridos de propulsión solar tienen perspectivas muy prometedoras en el futuro. Aunque en realidad requiere un costo de inversión inicial muy grande, este es proporcional a los beneficios que se pueden obtener después, combustible sin carbono, sin emisiones de GEI y mínimo impacto ambiental.



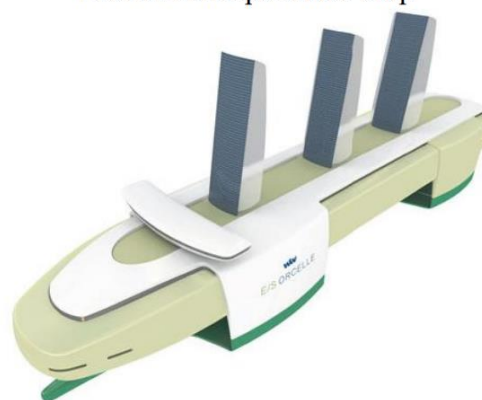
NYK Super Eco



Eoseas Concept Cruise Ship



Hornblower Hybrid



E/S Orcelle

Figura 1.6 : Barcos prototipo que funcionan a partir de energía solar e híbrida. (Extraída de (Tuswan et al., 2022))

Energía de las olas y las mareas

La conversión de energía de las olas (WEC) es la definición de conversión de la energía de las olas del océano en la forma deseada, generalmente energía eléctrica o mecánica. El uso de la energía de las olas como fuente de energía en barcos es de muy poca utilidad, aún en fase experimental y de aplicación para barcos pequeños. Uno de los conceptos de conversión de energía de las olas en el barco es un sistema de propulsión devoradora de olas (WDPS) que utiliza dos aletas (hidroala) debajo del barco. La lámina genera empuje directo a partir de la energía de las olas y reduce el movimiento de balanceo y cabeceo del barco en condiciones de mar agitado. El barco que utiliza este concepto es el SUNTORY Mermaid II. (Tuswan et al., 2022)

Debido a la limitación de los combustibles fósiles y sus impactos ambientales negativos, se han realizado varias investigaciones sobre el desarrollo de recursos renovables. Por lo tanto, los recursos energéticos convencionales pueden sustituirse por diferentes tipos de recursos energéticos renovables, como la energía solar, eólica y oceánica (es decir, olas, mareas, corrientes marinas y

gradientes térmicos). Entre los diversos recursos de energía renovable limpia y verde, la energía de las olas se conoce como un recurso energético con impactos negativos limitados y la mayor densidad de energía. El potencial global de energía de las olas se ha evaluado entre 1 y 10 TW, lo que es comparable con la demanda mundial de energía. Hay varios estudios en la literatura que han evaluado los recursos de energía de las olas en diferentes regiones del mundo. Teniendo en cuenta los costos de construcción y operación de los WEC (convertidores de energía de las olas), la economía dicta que hay sitios más apropiados para los parques de olas. Investigaciones dicen que las características de la energía de las olas, en términos de estados del mar, que son importantes para seleccionar el WEC más apropiado y con la máxima eficiencia. (Hadadpour S et al., 2014)

Entre las principales ventajas de la energía mareomotriz en comparación con otras fuentes renovables se encuentran: (i) la alta previsibilidad del recurso, (ii) ausencia de flujos extremos (a diferencia de la energía eólica), (iii) altos factores de carga y (iv) baja ocupación visual y del suelo. Por otro lado, las principales desventajas son: (i) las posibles perturbaciones que se pueden provocar en el medio marino y (ii) la tecnología de convertidores de energía mareomotriz se encuentra en una fase temprana de desarrollo, lo que se refleja en el hecho de que en la actualidad sólo hay unos pocos parques de mareas en funcionamiento. (Ramos V et al., 2014)

Desde 1799 se han patentado más de mil dispositivos WEC. Hay una clasificación del sistema WEC que considera: (i) ubicación del dispositivo con respecto a la costa; (ii) tamaño y dirección del dispositivo en comparación con la ola entrante; y (iii) principio de funcionamiento. Entre dichos dispositivos, la atención se centra aquí en aquel tipo de WEC que pueden empotrarse en el dique del puerto, tanto en diques de pared vertical como en diques de talud. Específicamente, aquí se consideran cuatro tipos de sistemas: dispositivos de columna de agua oscilante (OWC), sistemas OWC modificados con un conducto interno en forma de U (U-OWC), absorbentes puntuales y dispositivos de desbordamiento. Los dos primeros tipos de sistemas (es decir, OWC y U OWC) se basan en el mismo principio de funcionamiento: el movimiento de las olas provoca una variación del nivel del agua que ingresa, a través de un espacio en la pared vertical frontal, en una cámara interna donde se encuentra el aire comprimido y descomprimido. De esta forma, el flujo de aire atraviesa una turbina que puede funcionar en ambas direcciones. (Naty S et al., 2016)

Energía Nuclear

La propulsión nuclear de buques existe desde 1955, principalmente para usos navales y de las fuerzas armadas. La energía nuclear es atractiva debido a su alta densidad de potencia, su valor constante y sus pequeñas emisiones de GEI. Un beneficio adicional significativo de la propulsión nuclear es su capacidad de funcionar durante períodos prolongados sin repostar combustible, lo que promueve la independencia y protege contra las oscilaciones del precio del combustible. En términos tanto de tecnicismos como de finanzas, la propulsión nuclear ha demostrado ser esencial para las misiones en el ártico ruso, especialmente para los rompehielos, donde es necesaria una demanda de alta potencia. La propulsión nuclear se logra calentando vapor con un reactor nuclear a bordo, que impulsa turbinas y generadores de vapor. Sin embargo, la propulsión nuclear es improbable debido a “consideraciones políticas”, como la falta de voluntad de las autoridades portuarias para permitir que se embarquen buques extranjeros con un reactor nuclear. La concesión de licencias, la certificación y la seguridad contra accidentes, actos terroristas y su propagación son otras dificultades para la propulsión nuclear. Otra dificultad de la propulsión nuclear es la radiactividad y la eliminación del uranio natural, lo que plantea importantes problemas medioambientales y de salud. Esto requerirá de un rediseño total de los buques mercantes, ya que la seguridad tendrá prioridad sobre la eficiencia. Con el actual enfoque en la reducción de las emisiones de GEI, la energía nuclear puede volver a centrarse en el futuro en suministrar hidrógeno a los buques. (Issa M et al., 2022)

Velas de cometa

Las velas tipo cometa están unidas a la proa del barco y funcionan a gran altura para aprovechar las fuertes velocidades del viento. La vela tipo cometa puede ayudar a los armadores a ahorrar entre un 10 y un 35 % en costes anuales de combustible. El MS Michael A. fue el primer buque portacontenedores que utilizó en parte una vela tipo cometa. (Issa M et al., 2022)



Figura 1.7 : Barco con vela cometa. (Extraída de (Issa M et al., 2022))

Lubricado por aire

La lubricación por aire es un diseño novedoso que utiliza aire como lubricante para reducir la fricción del casco. Se crea una capa de aire entre la parte inferior cuidadosamente diseñada de la embarcación y la superficie del agua, lo que le permite deslizarse a través del agua de manera efectiva y reducir la resistencia entre un 5% y un 15%. Con un software comercial de dinámica de fluidos por computadora (CFD), se analizaron computacionalmente dos geometrías distintas, observando la influencia de la lubricación por aire en el consumo de combustible, y estimaron que podría reducirse en un 8%. La lubricación por aire se puede realizar de tres formas. (Issa M et al., 2022)

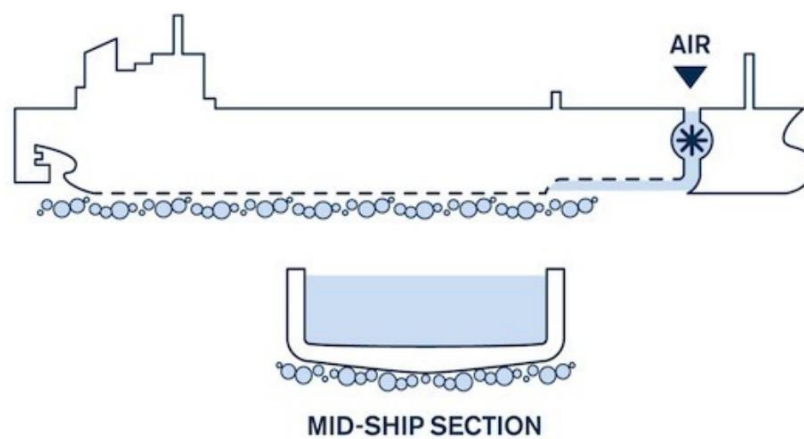


Figura 1.8: Esquema del sistema de suministro del aire a la sección del barco. (Extraída de (Issa M et al., 2022))

1.5.2 Puerto

Estas soluciones se aplican solo a los puertos, esta se pueden aplicar solo en tierra o buscan afectar solo los procesos que involucren el su entrada o salida del puerto. Estas medidas afectan solo los modos de operación maniobra y puerto.

1.5.2.1 Gestión

Estrategias de gestión verde en puertos

En los últimos años, con el avance de la economía y la industrialización, la contaminación ambiental se ha exacerbado y ha recibido gran atención por parte de las autoridades correspondientes. Esto ha resultado en mayores desafíos para implementar sin la intervención de las partes interesadas con la ayuda de regulaciones y estrategias. Las estrategias de gestión portuaria verde son los componentes principales durante el proceso de desarrollo de la sostenibilidad ambiental. Sobre la base de tecnología fundamental, una cooperación más estrecha y soluciones de vanguardia provenientes de transportistas y proveedores pueden superar los desafíos actuales. Antes de formular estrategias de gestión para lograr la sostenibilidad, el proceso más esencial es evaluar las herramientas de gestión actuales y el entorno portuario ambiental. Debido a que los procesos de investigación e identificación consumen mucho tiempo, se ha demostrado que un sistema ayuda a los administradores portuarios globales a resolver una serie de problemas para cumplir los objetivos de desarrollo ambiental. En el proceso de generación de estrategias, se sugiere que los puertos sean conscientes de posibles complejidades y conflictos entre estrategias y lineamientos a nivel local, estatal, nacional, regional e internacional. En particular, las partes interesadas del puerto tienen diferentes intereses y necesidades, pero deben trabajar juntas como un todo para lograr el desarrollo sostenible del puerto. (Zhang et al., 2023)

Como ejemplo, el puerto de Rávena en Italia implementó una estrategia de gestión portuaria inteligente, crearon una organización llamada “Asociación localmente integrada” (LIP), que incluía a gerentes de la empresa que estaban estrechamente relacionados con las autoridades locales. La cooperación y el compromiso de las partes interesadas podrían acelerar la aplicación de la estrategia de gestión y el diseño conjunto de la hoja de ruta en 2021-2023. En cuanto a España, se realizó cooperación entre puertos y ciudades para fortalecer la industria turística, al abordar los desafíos en las ciudades y el turismo de cruceros, estas dos partes crean estrategias de ciudad portuaria que se centran en direcciones de colaboración y marketing que son beneficiosas para las autoridades portuarias y los administradores de destinos, además, estas estrategias proporcionan recursos y

experiencia fructíferos para otros puertos. Las estrategias de gestión energética también se toman en serio porque la contaminación está directamente relacionada con el consumo de combustible. Uno de los destacados los puertos está en Rotterdam, Países Bajos, la ciudad de Rotterdam creó una Iniciativa Climática de Rotterdam, cuyo objetivo es cooperar con varias autoridades, incluidos gobiernos locales, organizaciones, empresas y otras partes interesadas, para lograr una reducción del 50 % de las emisiones de CO₂ en 2025 en comparación con 1990. (Zhang et al., 2023)

En general, las estrategias de gestión energética sostenible para los puertos son puntos clave para cumplir los objetivos de sostenibilidad. Sin embargo, la disminución de los recursos y el aumento de los impactos ambientales también plantean desafíos para las partes interesadas. Necesitan trabajar juntos y participar en el cumplimiento de regulaciones y requisitos cada vez más estrictos, lo que puede abrir posibilidades para el futuro desarrollo de los puertos. (Zhang et al., 2023)

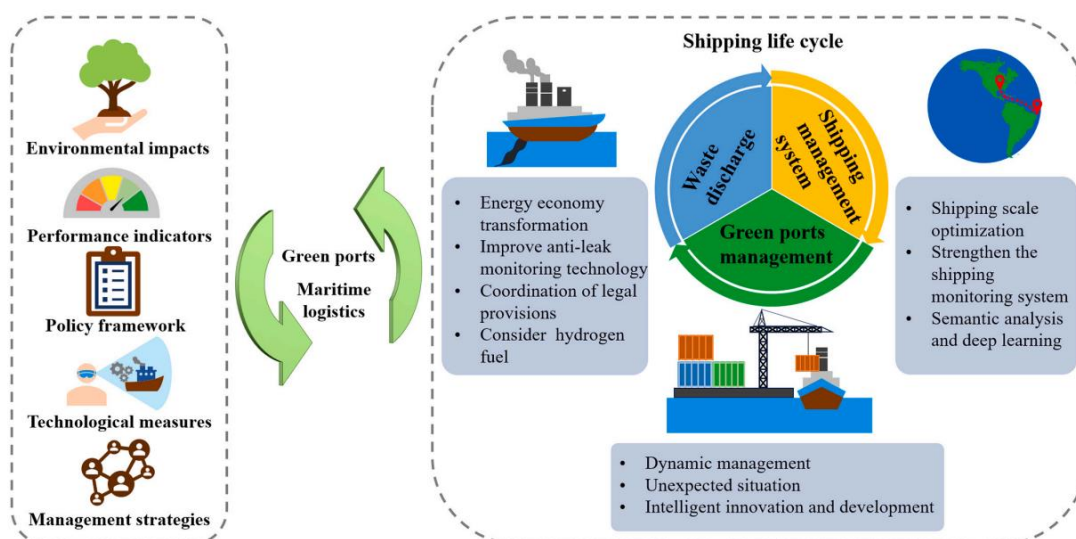


Figura 1.9 : Esquema conceptual de la Gestión Verde, ciclo de transporte verde. (Extraída de (Zhang et al., 2023))
Indicadores de desempeño del desarrollo portuario verde

La evaluación de los indicadores de desempeño de los puertos verdes, como los puertos sostenibles, se logra principalmente centrándose en tres dimensiones: medio ambiente, economía y sociedad. La mejora del desempeño ambiental se centra en mejorar la eficiencia energética y mitigar las emisiones, con el objetivo de minimizar el impacto ecológico causado por la industria naviera. El desempeño económico prioriza el logro del avance económico de la comunidad local y la optimización de los beneficios, manteniendo al mismo tiempo la integridad ambiental y social. El desempeño social pone énfasis en el bienestar, la seguridad y el compromiso de la fuerza laboral dentro de la comunidad local, así como de las partes interesadas. La satisfacción de las partes interesadas juega un papel crucial en la promoción de puertos ambientalmente sostenibles. La

interacción entre las tres dimensiones y el delicado equilibrio de sus relaciones son consideraciones fundamentales en el desarrollo de puertos ambientalmente sostenibles. Muchos estudios se centran principalmente en el impacto ambiental como indicador de desempeño de los puertos verdes, se realizó una evaluación del desempeño ambiental en el puerto de Shanghai, el puerto de Hong Kong y el puerto de Taiwán. Los hallazgos indicaron que las dimensiones de “gestión de la contaminación del aire” y “gestión de la contaminación líquida” exhibieron la mayor importancia entre los tres puertos. En 2018 se llevaron a cabo una evaluación integral de cinco años de los indicadores de desempeño ambiental para 30 puertos, revelando una mejora general en la sostenibilidad ambiental. En 2020 se realizó un análisis de los indicadores de desempeño ambiental de 90 puertos europeos, revelando un alto nivel de capacidad de respuesta en términos de cumplimiento de la legislación ambiental y la implementación de políticas de gestión dentro de las estrategias ambientales portuarias. Además, en 2022 se analizaron los indicadores de desempeño ambiental de 97 puertos europeos y destacaron que la calidad del aire ha seguido siendo constantemente una preocupación importante para estos puertos. (Zhang et al., 2023)

El creciente énfasis en el desempeño ambiental ha resultado en obligaciones legales más estrictas para el desarrollo portuario, impactando los intereses económicos y de las partes interesadas involucradas. La evaluación de la sostenibilidad verde en indicadores para puertos basados únicamente en el desempeño ambiental plantea desafíos importantes en términos de exhaustividad y eficacia. Por lo tanto, un número cada vez mayor de estudios se esfuerzan por integrar las dimensiones económica y social con el medio ambiente para un análisis integral, múltiples estudios propusieron la integración de los puertos al problema de la red de transportistas oceánicos, teniendo en cuenta tres aspectos cruciales: medio ambiente, economía y sociedad. Los autores examinaron exhaustivamente el desarrollo de indicadores de sostenibilidad en la logística de la cadena de suministro marítima y portuaria y, en última instancia, concluyeron que priorizar la gestión ambiental es fundamental para promover los puertos verdes. En 2016 se propuso un marco conceptual para establecer lineamientos de gestión para el desarrollo portuario sustentable, incorporando distintas dimensiones: externa e interna. La construcción de puertos verdes puede potencialmente incentivar a las partes interesadas externas a mejorar su responsabilidad social en la mitigación de los impactos ambientales. En 2022 se desarrolló un modelo de evaluación del desempeño para evaluar el desempeño ecológico de cinco puertos en China, centrándose específicamente en el impacto del producto interno bruto (PIB) per cápita y el establecimiento de un sistema de gestión ambiental. El desarrollo de puertos verdes está influenciado por las variaciones en la distribución de la población y el PIB entre las diferentes regiones portuarias. Como uno de los componentes fundamentales en el desarrollo portuario, las partes interesadas están atrayendo cada vez más atención. Dado que los empleados constituyen los

principales actores del puerto, priorizar su bienestar y seguridad se considera un factor crucial para fomentar desempeño y desarrollo portuario. En 2016 realizaron una evaluación del desempeño sostenible de los tres puertos de contenedores en Taiwán (puerto de Keelung, puerto de Kaohsiung y puerto de Taichung) como estudios de caso, los autores descubrieron que la seguridad de los empleados y las preocupaciones relacionadas dentro de la dimensión social presentaban la mayor influencia en términos de importación. En 2017 se recopilaban muestras de 203 partes interesadas jerárquicas distintas del puerto de Shanghai, el puerto de Hong Kong y el puerto de Busan y realizaron un análisis de indicadores sostenibles aplicables a los puertos desde cinco perspectivas diferentes. Entre estas perspectivas, tres están directamente asociadas con las partes interesadas, destacando su papel fundamental en el desarrollo sostenible de los puertos. En consecuencia, los beneficios a los empleados desempeñan un papel crucial en la mejora del desempeño económico y social, mientras que abordar las demandas de las partes interesadas ejerce una influencia favorable en el avance de las instalaciones portuarias sostenibles. Sin embargo, la participación de diferentes partes interesadas con diferentes intereses en diversos puertos genera diferencias en los objetivos de desarrollo, lo que dificulta el establecimiento de un conjunto unificado de indicadores de desempeño sostenible para medir la sostenibilidad portuaria. No obstante, la investigación actual sobre indicadores de desempeño de puertos verdes se centra principalmente en estudios de caso de puertos específicos. Por lo tanto, es imperativo explorar y analizar más a fondo un marco unificado de evaluación del desempeño en futuros estudios de desempeño portuario. Los resultados de este esfuerzo contribuirán a establecer un marco estandarizado de evaluación de puertos verdes para otros gestores portuarios. (Zhang et al., 2023)

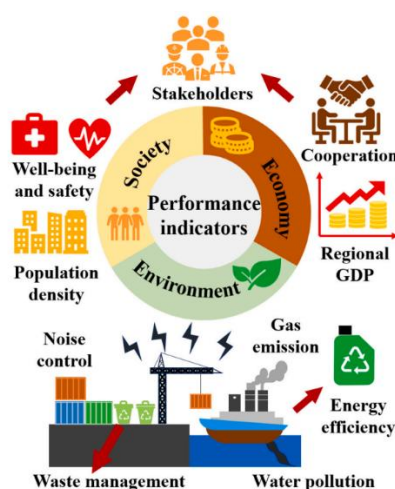


Figura 1.10 : Esquema conceptual de la Gestión Verde, indicadores de desempeño verde. (Extraída de (Zhang et al., 2023))

Sistemas portuarios bajos en emisiones

Iluminación:

Muchas operaciones en el puerto funcionan las 24 horas del día, lo que requiere el uso de electricidad, como por ejemplo en aparatos de iluminación. Por lo tanto, una parte importante de las emisiones de GEI proviene de la electricidad general utilizada para la iluminación. Para mitigar el impacto de la iluminación en la huella de carbono del puerto, los puertos siempre deben considerar bombillas más eficientes energéticamente como una forma de obtener una mejor iluminación con un uso más eficiente de la electricidad. Se deberían explorar los diodos emisores de luz (LED) como alternativa a la iluminación fluorescente. Aunque la iluminación LED puede resultar inicialmente costosa, ofrece muchos beneficios. Las luces de tubo LED suelen durar el doble que un tubo fluorescente promedio y son más eficientes energéticamente. (Misra et al., 2017)

En el caso del alumbrado público del puerto de Chennai en India, el puerto cuenta con 356 balastros de vapor de sodio a alta presión C de 20 W (250 W). El alumbrado público solar no se considera una solución viable debido al coste adicional que suponen las baterías, ya que la energía solar disponible por la mañana se almacena en baterías y se utiliza más tarde por la noche. Por lo tanto, sustituir las farolas disponibles por farolas LED de 120 W proporciona un potencial de ahorro de energía anual de 233.892 kWh, considerando 365 días £ 12 horas de uso. De manera similar, para edificios oficiales, reemplazo de 4625 luminarias de doble luminaria T-8 tipo FTL (luz de tubo fluorescente; 80W) por luminarias de doble luminaria T-5 tipo FTL. (64 W) podrían producir un potencial de ahorro de energía de casi 220 900 kWh considerando 365 días £ 10 horas de uso. Estas modificaciones de iluminación sugeridas compensan casi 514 toneladas de emisiones de CO₂e por año. (Misra et al., 2017)

1.5.2.2 Tecnología

Automated Mooring

Hoy en día existen sistemas de amarre automático mediante ventosas (AMS) instalados en muchos puertos comerciales de todo el mundo reducen considerablemente el tiempo necesario para realizar las maniobras de amarre y desamarre de los buques. Con estos sistemas, el tiempo empleado en las operaciones para asegurar un barco a tierra y liberarlo para navegar se reduce a un intervalo de tiempo de unos 30 segundos, mientras que las mismas operaciones duran unos 30 minutos con los

sistemas de cables tradicionales. Un estudio cuantifico la reducción de emisiones de CO₂ en el puerto de Santander en un muelle Ro-Ro en el que se iba a instalar este AMS, se investigó en qué puertos ya estaba instalado el sistema y qué tipos de embarcaciones lo utilizaban. Uno de los hallazgos más sorprendentes fue que la mayoría de los sistemas AMS instalados en el mundo estaban ubicados en instalaciones de tráfico de buques Ro-Ro/Pax (buques diseñados para el transporte de carga ro-ro, principalmente automóviles y camiones, y pasajeros). Existen estudios sobre este tipo de embarcaciones que se centran en analizar las emisiones de CO₂ que producen durante la navegación o durante su estancia en el muelle, que es cuando realizan actividades de suministro o carga y descarga, pero ninguno de estos estudios hizo referencia al tiempo dedicado a las maniobras. Se estima que las emisiones medias de un buque RoRo/Pax durante las operaciones de amarre durante un año podrían rondar las 833 toneladas. (Díaz-Ruiz-Navamuel E et al., 2018)

El AMS consiste en una tecnología de amarre automático basada en un vacío que asegura todo tipo de embarcaciones de forma segura al muelle, eliminando la necesidad de líneas de amarre convencionales (cuerdas y cables). El sistema consta de unos robots de amarre equipados con ventosas teledirigidas, estas pueden instalarse en el borde del muelle o sobre él, van montados sobre brazos accionados hidráulicamente y que se extienden para conectar así las ventosas con el casco del barco en cuestión de segundos. En realidad, la reducción de CO₂ se produce cuando los buques utilizan estos nuevos sistemas de amarre; la diferencia está en el tiempo necesario para realizar las maniobras de amarre o asegurar las embarcaciones al muelle. Utilizando este sistema de amarre, los buques se atan al muelle de forma segura en menos tiempo que utilizando técnicas de amarre convencionales. Esto permite reducir el tiempo de funcionamiento del motor, disminuyendo así las emisiones y mejorando la eficiencia operativa. Por medio de sofisticados controles electrónicos e hidráulicos, minimizan los movimientos de las embarcaciones amarradas, manteniendo sus posiciones con precisión milimétrica ante cualquier condición meteorológica adversa. El primer AMS se instaló en 1999 en Nueva Zelanda y constaba de un sistema de dos partes: la ventosa instalada en el casco del propio barco y una placa metálica en el muelle. A partir de aquí se mejoró el sistema y se instaló el siguiente en el muelle en 2001, eliminando la necesidad de instalar ninguna pieza en el buque, de modo que el AMS podría ser utilizado por cualquier buque atracado en el muelle. (Díaz-Ruiz-Navamuel E et al., 2018)



Figura 1.11 : Sistema automático de Mooring con ventosas. (Extraída de (Díaz-Ruiz-Navamuel E et al., 2018))

Shore Power o Cold Ironing

OPS, también conocida como energía marítima alternativa, electricidad en tierra, energía en tierra, conexión de barco a tierra, planchado en frío o suministro de energía en tierra, es la práctica de utilizar un puerto móvil de frecuencia variable y alimentación de voltaje para suministrar electricidad. Esto implica que los barcos amarrados apaguen sus motores suplementarios a bordo y utilicen la energía sostenible proporcionada por el puerto para operar las funciones principales del barco y proporcionar electricidad a todas las comodidades internas, incluida la iluminación, el aire acondicionado y el equipo para cargar y descargar. Un sistema eléctrico en el barco (dispositivo receptor a bordo), un sistema de gestión de cables y una infraestructura de sistema eléctrico en tierra constituyen las tres partes fundamentales del OPS. Las ventajas ambientales y socioeconómicas del OPS incluyen una mejor calidad del aire, menos sonido y menos riesgos para la salud derivados de eventos marítimos en el atraque. El uso de OPS puede reducir las emisiones de fuselajes peligrosos de los buques anclados y salvaguardar la atmósfera en los puertos marítimos. Como resultado, varios estudios han demostrado que los OPS pueden reducir las emisiones de gases peligrosos, mejorando significativamente la calidad de la atmósfera portuaria y generando efectos económicos y sociales positivos. (Kim et al., 2023)

Se encontró que en áreas donde se ha implementado, OPS ha reducido el dióxido de carbono (CO₂) en un 9,4 % (Fort Lauderdale, EE. UU.), un 85,0 % (Francia) y un 99,5 % (Oslo, Noruega).

Se evaluó empíricamente los efectos del uso de OPS, que mejora los resultados ecológicos en el sector marítimo. Las ventajas de OPS son sustanciales desde el punto de vista ambiental, pero todavía existen preocupaciones sobre los costos. Se destaca la necesidad de hacer esto para lograr el equilibrio entre el costo total de OPS y las emisiones de carbono de los buques. Esta estrategia de asignación de OPS debería incluir una mayor capacidad de potencia de OPS y la adopción de patrones de OPS en el muelle. Como resultado, el vasto conjunto de investigaciones existentes ha propuesto un paradigma para evaluar la viabilidad económica y la eficacia de la inversión en OPS teniendo en cuenta consideraciones ambientales y tecnoeconómicas. En consecuencia, se han evaluado cuantitativamente las ventajas económicas y medioambientales de adoptar energía costera para el futuro (NO_x y CO₂). También se demostró que la adopción de energía en tierra con el tiempo puede tener importantes efectos positivos en la economía, el medio ambiente y la sociedad. (Kim et al., 2023)

El OPS es una nueva tecnología para una industria del transporte marítimo en rápida expansión, pero sigue siendo una tecnología nueva con considerables desafíos de implementación. En este sentido, se señala que OPS se encuentra todavía en una fase inicial y que, a pesar de diversas soluciones técnicas y pruebas de su aplicabilidad en las operaciones diarias, las inversiones financieras necesarias para las instalaciones apenas se han materializado. Además, debido al alto costo del procedimiento de actualización de la infraestructura eléctrica, las organizaciones portuarias con frecuencia dudan en adoptar la tecnología OPS. El despliegue de OPS involucra a múltiples partes interesadas, incluidos gobiernos, armadores, autoridades portuarias y operadores portuarios. El beneficio económico es el principal factor que influye en la aceptación de los OPS porque los operan organizaciones comerciales y los propietarios de buques preocupados principalmente por los rendimientos financieros de sus inversiones. En este sentido, un obstáculo importante para OPS son las tarifas que se aplican a la energía eléctrica, ya que compiten con la de los combustibles para los buques. Finalmente, desde el punto de vista del gobierno, la mayoría de las investigaciones se concentran en las subvenciones administrativas, que son las principales estrategias utilizadas por los gobiernos para fomentar la implementación de OPS. Estudios previos de OPS han identificado los beneficios y desventajas de utilizar OPS, sin embargo, se ocupan principalmente de la instalación de OPS y no incluyen puertos y operadores de terminales como factores. Además de las barreras comúnmente utilizadas en estudios anteriores como factores económicos, técnicos, operativos y externos, se encontró nuevas barreras como la falta de instalaciones de OPS disponibles y el uso innecesario de OPS debido a la introducción de embarcaciones ecológicas. (Kim et al., 2023)

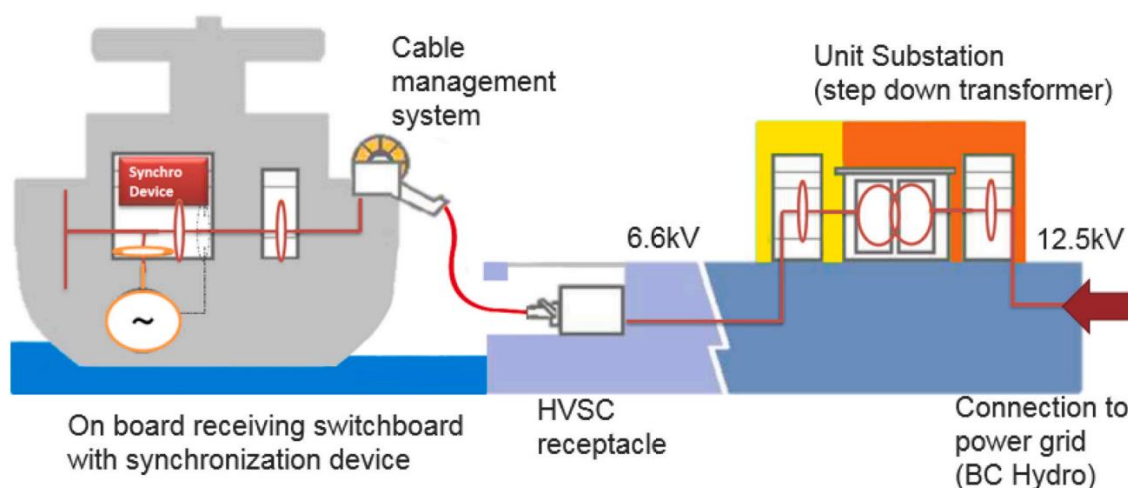


Figura 1.12 : Imagen referencial de las 3 partes más importantes del sistema OPS. (Extraída de Kim A et al., 2023)

1.6 Conclusiones del Capítulo

En el capítulo se concluye en base a antecedentes recopilados el rol fundamental que cumple el transporte naviero dentro del mundo y la economía mundial, ya que este transporta entre un 80% y un 90% del comercio internacional. Este importante sector del transporte también ha manifestado en estos últimos años un notable incremento de 250% en los últimos 40 años, tomando un rol en lo que respecta a conservar y/o mejorar la calidad de vida de la sociedad. Dado su rol en el mundo y la economía este sector ha enfrentado represalias y presiones para volverse más amigable con el medio ambiente y contribuir sostenibilidad, esto considera tópicos como el consumo de energía, la contaminación acústica, la pérdida de biodiversidad y las emisiones contaminantes. En lo que respecta a las emisiones de GEI, el sector naviero genera un 3 % de las emisiones totales.

La industria naviera tiene aproximadamente una demanda total de energía de 13 millones de TJ, consumo que se mantiene relativamente estable según los informes OCDE para el 2050. La mayoría de los barcos consume combustibles de alta composición fósil, estos generan gases contaminantes como SO_x, NO_x, CO, CO₂, y PM. La principal institución que se encarga de buscar medidas que permitan reducir las emisiones es la OMI, esta busca limitar los efectos negativos por medio de la MARPOL, convenio que tiene como objetivo el reducir el 50% de las emisiones anuales de gases de efecto invernadero para el 2050.

Las medidas de mitigación ambiental han sido promovidas principalmente por tres razones: presión gubernamental, intereses sociales o privados y factores sociales. Las medidas de mitigación ambiental han sido fruto de la innovación verde, solución clave que busca desarrollar tecnologías para reducir las emisiones de carbono y mitigar el cambio climático. En estas últimas décadas ha habido un aumento en la búsqueda e interés en el desarrollo de tecnologías de mitigación del cambio climático.

El caso de interés para esta investigación es la bahía de Quintero, zona de alta actividad económica donde se concentra una gran cantidad de empresas llamado complejo ventanas. Esto ha llevado a que esta zona se vuelva extremadamente sensible y vulnerable desde el punto de vista ambiental debido a la generación de sustancias ambientales. En consecuencia el MMA haya llevado al desarrollo de un plan de recuperación ambiental, por lo que se ha visto la necesidad por parte de las autoridades de encontrar medidas de mitigación.

A través de la revisión y análisis de investigaciones y estudios, se logró recopilar y clasificar 24 medidas de mitigación que pueden contribuir a la mitigación de emisiones en Quintero.

2 METODOLOGÍA DE CÁLCULO

En este capítulo se presenta en detalle la metodología con que se aborda la información disponible respecto al transporte marítimo y como es tratada para el desarrollo de estimaciones sobre el nivel de emisiones producidas, dentro del transporte naviero en ámbito nacional e internacional relacionado con los puertos de Quintero. El capítulo incluye principalmente información con la cual reconocer los distintos tipos de embarcaciones y sus características, el análisis de la información de movilización de buques, las relaciones de cálculo para estimar emisiones, la herramienta de georreferenciación utilizada y los supuestos o consideraciones con las que se usa la metodología.

En la sección se introducen los conceptos bases con los cuales se va a efectuar el cálculo de las emisiones y el análisis de sus comportamiento. Aquí se detalla las principales características de un navío como potencia del motor principal, potencia del motor auxiliar, velocidad del motor, el tipo de combustible que usa, el tipo de embarcación de acuerdo a la función que desempeña y los modos de operación de acuerdo a los cuales estos funcionan.

Por otro lado, también se muestra cómo se realizó el cálculo de las emisiones para el caso de estudio. Se cubren 2 tópicos: los factores de emisión que establecen una relación entre la cantidad gas emitido con la energía utilizada y las ecuaciones generales que obtienen la cantidad de emisiones emitidas según los distintos factores relevantes para el cálculo.

En la sección entrega la metodología de georreferenciación con la que se obtuvieron distancias entre dos locaciones portuarias del planeta.

Para la parte final se establecen los supuestos principales que se aplicaron para el uso de la metodología mencionada. En esta parte se mencionan las simplificaciones y condiciones específicas que se decidieron tomar para que los cálculos sean en lo posible lo más prácticos y precisos.

2.1 Nivel de Actividad Marítimo

Para la metodología de cálculo de las emisiones por los navíos se utilizó la memoria de titulación de Claudio Flores Castro, realizada en la UTFSM durante el año 2023, a continuación se presentan las secciones más relevantes de esta metodología respecto a esta investigación. El cálculo de los niveles de actividad del modo marítimo requiere del conocimiento de 5 conceptos básicos que rigen el funcionamiento general de un barco y describen el comportamiento de las emisiones de estos:

- Tipo de Motor
- Velocidad de Motor
- Tipo de Combustible
- Tipo de Embarcación
- Modo o fase de operación

Tipo de Motor: Generalmente las embarcaciones cuentan con la capacidad de ser autosuficientes para proveerse de la energía que requieren, en este sentido es que presentan diversas fuentes de energía para cumplir distintas funciones como el desplazamiento y las operaciones a bordo. Estas fuentes se clasifican entre motor principal (ME), que se utiliza principalmente para la propulsión, mientras que para la electricidad a bordo se recurre a los motores auxiliares (AE), que utilizan petróleo y derivados.

Velocidad de Motor: Los motores de las embarcaciones se clasifican de acuerdo con la velocidad del motor como de velocidad alta (HSD), velocidad media (MSD) y baja velocidad (SSD), en donde los ME son principalmente del tipo MSD y SSD, mientras que los AE corresponden normalmente a HSD y MSD.

Tipo de Combustible: Las embarcaciones utilizan diversos combustibles clasificados primeramente por su viscosidad. De esta manera se encuentran los Destilados Marinos (MD) hasta los más pesados como petróleo residual o petróleo negro (RO), también denominado como HFO.

- El RO es el más utilizado dentro de las embarcaciones, pues se utiliza en la mayoría de los motores diésel, siendo necesario para el funcionamiento del motor principal.
- Entre los combustibles MD, estos se pueden clasificar entre Marine Gas Oil (MGO) y MDO (Marine Diesel Oil). De estos el MGO o Gasóleo marino corresponde a un hidrocarburo líquido utilizado en motores marinos de diésel, necesario para el funcionamiento de motores auxiliares en embarcaciones. Por otro lado, el MDO o Diesel Marino corresponde a una

mezcla de MGO y RO, este combustible es ampliamente utilizado en motores marinos auxiliares de diésel de alta y media velocidad.

- **Nuevos combustibles:** En la búsqueda de reducir las emisiones producidas por el uso de combustibles fósiles en las embarcaciones, es que aparecen una serie de nuevos combustibles que son más amigables con el medio ambiente, como es el caso de biocombustibles, sin embargo, estos sufren de incertidumbres en su producción y sustentabilidad, por lo que han visto frenado su desarrollado. Por otro lado, se tienen el amoniaco, el metanol y el hidrógeno, combustibles los cuales su producción resulta más sustentable y se pronostica que su uso sea necesario para reducir las emisiones producidas por las embarcaciones. Es por esto que algunas empresas, como es el caso de Maersk, pretenden introducir en su flota, para el año 2024, embarcaciones cuyo combustible sea metanol.

Tipo de Embarcación: Los tipos de embarcación que se utilizan varían dependiendo del tipo de mercancía que transportan los barcos, así como si el transporte es de tipo cabotaje o bunker. A continuación, se presentan los tipos de embarcaciones analizados en esta investigación, con sus características respectivas.

Tipo	Tipo ENTEC UK	Nudos	Capac	FO	ET_ME	ET_AE	FT_ME	FT_AE	ME [kW]	AE [kW]
TLE	Tanker	14,3	15.000	50%	SSD	MSD	RO	MD	9050	2440
GRL	General Cargo	13,2	80.000	30%	SSD	MSD	RO	MD	3020	1000
FRI	General Cargo	13,2	50.000	40%	SSD	MSD	RO	MD	3020	1000
ROF	Ro-Ro Cargo	18	10.000	90%	MSD	MSD	RO	RO	8370	2510
PAS/PASC	Passenger	20,6	5.000	90%	MSD	MSD	MD	MD	4500	1580
GAS	Tanker	14,3	100.000	50%	SSD	MSD	RO	MD	9050	2440
GRA	Bulk Carrier	14,1	100.000	50%	SSD	MSD	RO	MD	8980	1890
PTR	Passenger	14,3	10.000	90%	SSD	MSD	RO	MD	4500	1580
PES	Fishing	13	5.000	80%	MSD	MSD	MD	MD	1920	1230
PET	Tanker	14,3	80.000	50%	SSD	MSD	RO	MD	9050	2440
PTC	Container Ship	21,2	10.000	40%	MSD	MSD	RO	RO	24200	5320
QUI	Tanker	14,3	25.000	50%	SSD	MSD	RO	MD	9050	2440
WEL	Fishing	13	10.000	90%	MSD	MSD	MD	MD	1920	1230
TEC1	General Cargo	13,2	100.000	50%	SSD	MSD	RO	MD	3020	1000
TEC2	General Cargo	13,2	100.000	50%	SSD	MSD	RO	MD	3020	1000
Otro	Otro	12,8	-	0%	MSD	MSD	MD	MD	2090	610

Figura 2.1 : Datos de los tipos de embarcación analizados, información de acuerdo a “UK Ship Emissions Inventory” de ENTEC UK del 2010.

La fuente de la información de esta tabla se detalla la información de interés de cada tipo de embarcación, tales como velocidad promedio en modo crucero, capacidad de carga, factor de

ocupación de carga, velocidad de motor principal y secundario, así como el tipo de combustible y la potencia de estos motores.

Modo o Fases de Operación: Las embarcaciones cuentan con distintas fases dentro de su operación, en las cuales producen distintos niveles de emisiones al funcionar de manera distinta para llevar a cabo sus actividades. Las fases se presentan a continuación:

- **Crucero:** Dentro de esta categoría se identifican todos los movimientos que realiza en altamar, donde principalmente realiza el desplazamiento desde el puerto de origen al de destino. En esta fase el ME está al 80% de su carga máxima y las emisiones de AE son relativamente despreciables.
- **Maniobra:** En esta fase de operación se identifican las emisiones que produce la embarcación para hacer ingreso o salida de un puerto. La distancia en la que la embarcación realiza las maniobras depende directamente del puerto, pues puede variar de acuerdo a la disposición del puerto, así como los requerimientos de cada embarcación, sin embargo, se considera un tiempo promedio de 1 hora en esta fase de operación. En esta fase se utiliza tanto el ME como el AE. Por lo general se usan barcos más pequeños llamados remolcadores para ayudar al barco a realizar el modo maniobra.
- **Puerto:** En esta fase la embarcación mantiene el ME apagado, siendo utilizado el AE para proveer de energía a la embarcación. Este motor se encuentra aproximadamente al 50% de carga.

2.1.1 Bases de Datos Modo Marítimo

Para esta investigación se utilizan dos bases de datos, una es el boletín estadístico 2023 generado por la DIRECTEMAR, entidad gubernamental encargada de fiscalizar las actividades marítimas en el territorio marítimo nacional, registrando las embarcaciones que recalán en el país. En este documento se recopilan información acerca de las exportaciones internacionales y el cabotaje generado durante el año en cuestión, mencionando las recaladas por puerto, tipo de carga, países de destino y tonelaje movido. La otra base de datos es el inventario de barcos o el registro de las faenas de practica del puerto de Quintero confeccionados por la DIRECTEMAR y facilitados por AMBIOSIS, en esta información se brinda los tipos de barcos, faenas, periodo de tiempo en que se realizan estas faenas, barcos remolcadores utilizados, entre otros.

2.1.2 Trabajo Previo de la Información Modo Marítimo:

En esta sección se presentan los pasos realizados para el tratamiento de la información, para la posterior aplicación de la metodología al modo marítimo. A continuación, se detalla el proceso realizado:

- Identificación de faenas en puerto: utilizando la información brindada por el inventario de barcos proporcionado por la DIRECTEMAR y el boletín estadístico se identifican los principales periodos, faenas y tiempos de faena de los barcos en los puertos.
- Identificar rutas de destino: se reconoce las rutas más transitadas por los barcos en aguas internacionales según la memoria de Claudio Flores.
- Identificar recaladas Nacionales o Internacionales: con el boletín estadístico se reconocen las recaladas para el puerto internacional y nacional asociadas al puerto de Quintero.
- Identificar tipo de barco: utilizando la fuente de datos ENTEC UK se reconocen los datos técnicos el tipo de barco que circula en los puertos y sus otras características. Esta fuente nos dice las potencias de los motores, tanto principal como auxiliar, las velocidades a las que trabajan estos motores, así como los combustibles que utilizan, además de la capacidad de transporte con los factores de ocupación respectivos.
- Identificar los factores de emisiones: las embarcaciones presentan Factores de Emisión (FE) que dependen del tipo de motor y el combustible utilizado para hacer funcionar estos mismos. Además de esto, depende de la fase de operación en la que se encuentre la embarcación. Tomando las consideraciones de SMED elaborado el año 2004 “Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors”, en el cual presenta una serie de tablas en las cuales se presentan los factores de emisión a cada gas contaminantes en relación a las características del barco.

2.2 Cálculo de Emisiones Modo Marítimo

Para el cálculo de emisiones correspondientes al modo marítimo se basa en la metodología presentada por EMEP/EEA dentro de su guía técnica “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016”, debiendo recurrir a otras fuentes de información de los factores de emisión de las embarcaciones, como lo presenta Swedish Methodology for Environmental Data (SMED) en “Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors”, la cual corresponde a una metodología para el cálculo de factores de emisión de embarcaciones, desarrollado en Suecia para la elaboración de reportes de emisiones internacionales, dentro de este se entregan

factores de emisiones para embarcaciones mayores a 100 GRT (Toneladas de Registro Bruto. Esta unidad de medida volumétrica equivalente a 100 pies cúbicos, hoy en día se encuentra obsoleta).

Con estas herramientas se dispone de la base teórica para calcular las emisiones que generan las embarcaciones durante los modos de operaciones, en base a ellas se aplicará la información que se dispone respecto al funcionamiento de puerto.

2.2.1 Factores de Emisión

Las embarcaciones presentan Factores de Emisión (FE) que dependen de los motores que se estén utilizando, así como de los combustibles utilizados para hacer funcionar estos mismos. Además de esto, depende de la fase de operación en la que se encuentre la embarcación. En base a estas consideraciones es que SMED elabora en el año 2004 “Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors”, en el cual presenta una serie de tablas de acuerdo con estas variables mencionadas. En ellas se presenta las emisiones correspondientes de una serie de gases contaminantes, junto con esto las tablas presentan variaciones respecto a mejoras aplicadas en las embarcaciones que buscan reducir las emisiones. En base a esto las tablas utilizadas contienen tecnologías de reducción de NOx, las cuales se presentan a continuación.

ET	FT	FC	NOx	CO	NMVOC	SOx	NH3	PM	CO2	CH4	N2O
SSD	MD	185	16,9	0,5	0,3	1,5	0,003	0,2	588	0,006	0,031
SSD	RO	195	16,9916	0,4962	0,2974	9	0,00532	1,3	620	0,006	0,031
MSD	MD	205	13	1,1	0,2	1,6	0,005	0,2	652	0,004	0,031
MSD	RO	215	13,3	1,1	0,2	9,9	0,006	0,5	683	0,004	0,031
HSD	MD	205	12	1,1	0,2	1,6	0,003	0,2	652	0,004	0,031
HSD	RO	215	12,7	1,1	0,2	9,9	0,003	0,5	683	0,004	0,031

Figura 2.2 : Factores de emisión de las embarcaciones asociados al modo crucero, elaborado a partir de “Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors” de SMED.

ET	FT	FC	NOx	CO	NMVOC	SOx	NH3	PM	CO2	CH4	N2O
SSD	MD	204	13,6	1	0,6	1,6	0,003	0,4	647	0,012	0,031
SSD	RO	215	13,5932	0,9924	0,5948	9,9	0,00532	2,6	682	0,012	0,031
MSD	MD	226	10,4	2,2	0,4	1,8	0,005	0,4	717	0,008	0,031
MSD	RO	237	10,6	2,2	0,4	10,9	0,006	1	752	0,008	0,031
HSD	MD	226	9,6	2,2	0,4	1,8	0,003	0,4	717	0,008	0,031
HSD	RO	237	10,1	2,2	0,4	10,9	0,003	1	752	0,008	0,031

Figura 2.3 : Factores de emisión de las embarcaciones asociados al modo maniobra, elaborado a partir de “Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors” de SMED.

ET	FT	FC	NOx	CO	NMVOC	SOx	NH3	PM	CO2	CH4	N2O
MSD	MD	217	13,5	0,9	0,2	1,7	0,005	0,2	690	0,004	0,031
MSD	RO	227	14	0,9	0,2	10,4	0,006	0,5	722	0,004	0,031
HSD	MD	217	11,8	0,8	0,5	1,7	0,003	0,4	690	0,01	0,031
HSD	RO	227	12	1,3	0,5	10,4	0,003	0,5	722	0,01	0,031

Figura 2.4 : Factores de emisión de las embarcaciones asociados al modo puerto, elaborado a partir de “Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors” de SMED.

2.2.2 Cálculo de Emisión de Gases Contaminantes

Con el conocimiento de los FE para cada tipo de embarcación y el conocimiento de los niveles de actividad correspondientes a estos mismos se pueden calcular los gases contaminantes totales emitidos dentro de cada modo, tal como se presenta a continuación:

$$E_{C,j} = \sum_i N_{i,j} \cdot \frac{D_i}{v_j} \cdot \left(ME_j \cdot LF_{C,ME} \cdot FE_{C,ET,FT(@ME_j)} + AE_j \cdot LF_{C,AE} \cdot FE_{C,ET,FT(@AE_j)} \right)$$

Donde:

$E_{C,j}$ = Emisiones asociadas al modo crucero del tipo de embarcación j

$N_{i,j}$ = Número de recaladas en la ruta i del tipo de embarcación j

D_i = Distancia en kilómetros que recorre en la ruta i

v_j = Velocidad promedio durante el desplazamiento del tipo de embarcación j

ME_j = Potencia del motor principal del motor principal en kW del tipo de embarcación j

$LF_{C,ME}$ = Factor de Carga durante el modo crucero al que funciona el motor principal

$FE_{C,ET,FT(@ME_j)}$ = Factor de Emisión durante el modo crucero de acuerdo al tipo de motor ET y el tipo de combustible FT al que corresponde el motor principal de la embarcación j

AE_j = Potencia del motor auxiliar del motor principal en kW del tipo de embarcación j

$LF_{C,AE}$ = Factor de Carga durante el modo crucero al que funciona el motor auxiliar

$FE_{C,ET,FT(@AE_j)}$ = Factor de Emisión durante el modo crucero de acuerdo al tipo de motor ET y el tipo de combustible FT al que corresponde el motor auxiliar de la embarcación j

$$E_{M/P,j} = \sum_i N_{i,j} \cdot T_{prom,M/P} \cdot (ME_j \cdot LF_{M/P,ME} \cdot FE_{M/P,ET,FT(@ME_j)} + AE_j \cdot LF_{M/P,AE} \cdot FE_{M/P,ET,FT(@AE_j)})$$

$E_{M/P,j}$ = Emisiones asociadas al modo maniobra o puerto del tipo de embarcación j

$T_{prom,M/P}$ = Tiempo promedio durante el que la embarcación está en el modo maniobra o puerto

$LF_{M/P,ME}$ = Factor de Carga durante el modo maniobra o puerto al que funciona el motor principal

$FE_{M/P,ET,FT(@ME_j)}$ = Factor de Emisión durante el modo maniobra o puerto de acuerdo al tipo de motor ET y el tipo de combustible FT al que corresponde el motor principal de la embarcación j

$LF_{M/P,AE}$ = Factor de Carga durante el modo maniobra o puerto al que funciona el motor auxiliar

$FE_{M/P,ET,FT(@AE_j)}$ = Factor de Emisión durante el modo maniobra o puerto de acuerdo al tipo de motor ET y el tipo de combustible FT al que corresponde el motor auxiliar de la embarcación j

Posteriormente, es posible calcular las emisiones producidas por todos los tipos de embarcaciones dentro de cada modo de operación, se calcula con la siguiente expresión:

$$E_{C/M/P} = \sum_j E_{C/M/P,j}$$

$E_{C/M/P}$ = Emisiones totales correspondientes al modo crucero, maniobra o puerto de las embarcaciones

$E_{C/M/P,j}$ = Emisiones correspondientes al modo crucero, maniobra o puerto de tipo de embarcación j

Finalmente, el cálculo del total de gases contaminantes producidos por las aeronaves es calculado como:

$$E = E_C + E_M + E_P$$

E = Emisiones totales correspondientes al modo marítimo

E_C = Emisiones totales correspondientes al modo crucero

E_M = Emisiones totales correspondientes al modo maniobra

E_P = Emisiones totales correspondientes al modo puerto

2.3 Metodología de Georreferenciación

En esta sección se presenta la metodología utilizada para realizar la georreferenciación para determinar las distancias entre los puertos. La georreferenciación corresponde a la labor de reconocer una ubicación de interés respecto a otra ubicación. En este inciso se presenta la georreferenciación de las rutas de circulación de Quintero a los puertos de destino.

Conformado en el año 2005, SeaRates es una aplicación web que se encarga de ofrecer diferentes opciones de transporte, con un único objetivo, simplificar y optimizar el proceso de envío de mercancías. Tanto si se es el propietario de la carga, como una empresa que busca transportar mercancías, en Sea Rates se puede encontrar una comparativa de las mejores tarifas. Una de las características de esta herramienta es que permite establecer una ruta de un puerto a otro.

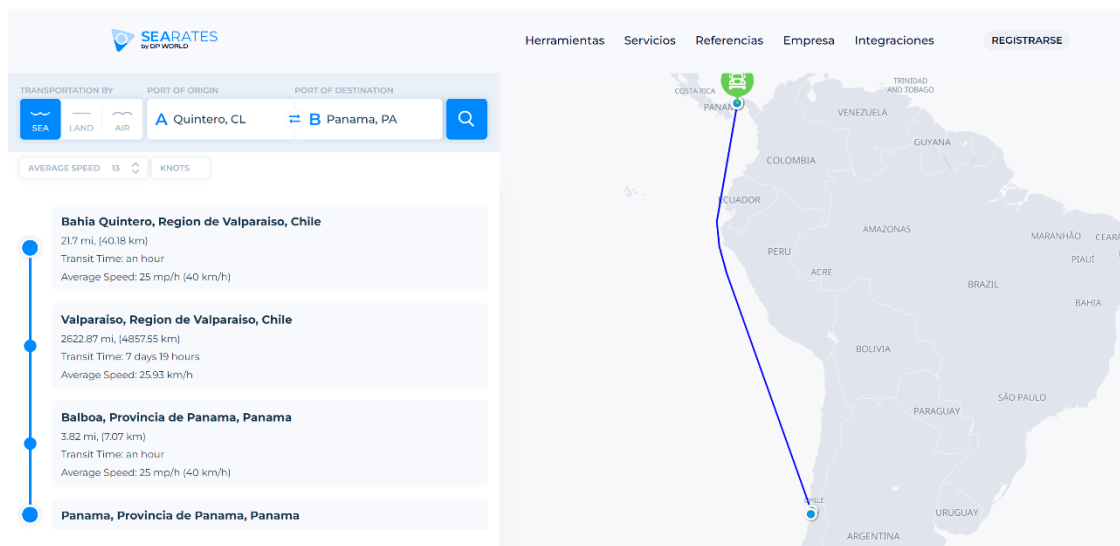


Figura 2.5 : Interfaz del sitio Sea Rates.

2.4 Supuestos

Para el uso de la metodología en general se asumieron ciertas condiciones o se tomaron algunas libertades, de manera de poder hacer la estimación con la información que se dispone en la forma más práctica y precisa posible, estas consideraciones utilizadas se mencionaran a continuación:

-Para todos los barcos se asumió de que estos usaban el combustible más utilizado en la industria llamado RO o destilado de petróleo, este es el más frecuentemente usado para el funcionamiento de tanto el motor principal como el auxiliar. Si bien el motor auxiliar no usa RO propiamente tal, este si utiliza comúnmente MDO que es una mezcla de gasóleo marino con destilado de petróleo.

-Como los puertos de Quintero las principales exportaciones y cabotaje se limitan solo a la carga general y liquida, por lo que se asumió que los únicos tipos de barcos que realizan el transporte de tonelaje son los del tipo GRL y TLE mencionados en la figura 2.1. Esto se debe a los navíos que transportan líquidos parecen bastante entre si respecto a las características técnicas relevantes.

-En cuanto a los factores de carga para los distintos tipos de modo de operación se asumió que en el modo crucero el ME opera a 1 y el AE opera a 1, en modo maniobra el ME opera a 0,2 y el AE opera a 1 y finalmente para el modo puerto el AE opera a 1 y el ME está apagado.

-Respecto a las recaladas, a los destinos de exportación y a algunas faenas de los barcos del puerto, no se contaba con la información en algunos casos particulares o esta no era del todo clara, por lo que se prefirió simplemente omitir esta información del cálculo, esto puede provocar que las emisiones calculadas sean menores a lo esperado, esto se podría notar especialmente en el modo maniobra o puerto.

-Las recaladas totales dadas por el boletín estadístico son distintas de las que se cuentan en el inventario de barcos, por lo que se usó el boletín estadístico solo para identificar las recaladas totales nacionales e internacionales para el modo crucero.

-Respecto al tipo de velocidad del motor se asume que el ME y el AE funciona con una velocidad de SSD o MSD.

- Para los barcos remolcadores se asumió los mismos factores de carga que para los buques de carga, además se asume que estos operan con una potencia de 4000 kW para el motor principal y de 1000 kW para el motor auxiliar.

-Se asume que todos los buques usan un combustible de 0,5% de azufre, ya que esa es la composición de azufre máxima que pueden tener estos combustibles en la bahía.

2.5 Conclusiones del Capítulo

El capítulo establece la información más relevante para poder determinar una estimación de las emisiones, donde se reconocen los cinco datos más importantes para identificar un buque, estos son: tipo de motor, velocidad de motor, tipo de combustible, tipo de embarcación y modo de operación.

Se determina además las bases de datos que se considera para la estimación, siendo estas el boletín estadístico e inventario de barcos de Quintero facilitados por la DIRECTEMAR. Se concluye que esta información debe ser manejada de forma previa al cálculo, de manera de establecer que se cuenta con la información suficiente para llevar el cabo en la estimación, de manera de poder establecer los debidos supuestos y/o reconocer los aspectos más relevantes de esta información.

En la metodología de cálculo mencionada se establece por medio de ecuaciones de emisiones totales y factores de emisión una forma práctica y confiable para poder determinar las emisiones que se generan con los barcos de Quintero, información que puede relacionarse de manera directa con la bases de datos explicada en el capítulo. La metodología usa la información proporcionada por la guía técnica “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016” y los factores de emisión que presenta Swedish Methodology for Environmental Data (SMED) en “Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors”,

En el capítulo se determina que la herramienta Sea Rates que permite tanto corroborar como determinar la georreferenciación para la locaciones de interés.

Se concluye que la metodología propuesta en el capítulo no se puede aplicar directamente, sino que requiere que se tomen algunas consideraciones para poder aplicarlas al caso de estudio, estos supuestos consideran casos como información faltante, simplificación de los cálculos y precisión de

la estimación. Estos supuestos consideran temas como tipos de barcos considerados, factores de carga, tipo de combustible a utilizar en general, tipo de velocidad para los motores, entre otros.

3 RESULTADOS NIVEL DE EMISIONES

En este capítulo se muestra el resultado del procesamiento de la información disponible junto con las estimaciones de las emisiones de los buques que circulan en los puertos de Quintero utilizando la metodología de la sección 2, esta estimación considera los tres modos de operación de los barcos. A lo largo del capítulo se realiza un paso a paso de cómo se obtuvieron los resultados mostrados, además de realizar un análisis general de todas las emisiones generadas por los tres modos junto con una comparativa gráfica de los 4 gases contaminantes que se consideran más relevantes: NOx, CO2, PM y SOx. Para la estimación del material particulado se estimó el tamaño PM10.

3.1 Nivel de emisiones Marítimas

En base a la metodología presentada en la sección 2, se obtienen los resultados de emisiones de gases contaminantes emitidas por embarcaciones en los puertos de Quintero y asociados a los tres tipos de modos de operación. También se realiza un análisis de los datos obtenidos.

3.1.1 Nivel de emisiones Marítimas en Modo Crucero

Para obtener las emisiones de los barcos en modo crucero se comparó la información del boletín estadístico de la DIRECTEMAR y el inventario de barcos de AMBIOSIS para ver que la información del movimiento de las naves concordara o en caso contrario determinar cuál es más conveniente usar según el caso. Al analizar las principales exportaciones e importaciones en el puerto se observa que la mayoría de la carga transportada es general o líquida, por lo que se asumió que los barcos que se movilizan a través de los puertos es de alguno de estos tipos, esto se debe a los navíos que transportan líquidos como químicos o petróleo se parecen bastante entre si respecto a las características técnicas relevantes, como por ejemplo la potencia de los motores. Esto se aplicó de igual manera para la estimación de los tres modos de operación.

Para los cálculos el tipo de barco determina la velocidad promedio y la potencia de los motores, esto se obtiene de los datos proporcionados por ENTEC UK mencionados en la sección 2, los datos utilizados se muestran en la imagen 3.1.

	% Carga [-]	Velocidad media [m/s]	P_ME[kW]	P_AE[kW]
General Cargo (GRL)	3%	26,484	4397	1011,31
Tanker (TLE)	97%	24,446	6543	2290,05

Figura 3.1 : Características técnicas relevantes para el cálculo de emisiones para buques del tipo GRL Y TLE.

En cuanto a las rutas de navegación se escogieron las rutas más transitadas registradas en la memoria de Claudio Flores. Respecto a la distribución de las recaladas se tomó como referencia las recaladas totales registradas en el boletín estadístico y se tomó una distribución de estas en proporción a la cargas liquidas y generales, tomando en cuenta además la distribución de las recaladas de la rutas más transitadas según Claudio Flores. A continuación se muestran los datos utilizados en la imagen 3.2.

	Distancia [km]	Recaladas [-]
Quintero-Balboa	4837,8	427
Quintero-Quintero	1,9	125
Quintero-Valparaiso	36,1	125

Figura 3.2 : Rutas de navegación en altamar más recorridas por barcos del puerto de Quintero junto con su recorrido y recaladas.

Respecto a los factores de emisión se tomó que el motor principal es del tipo SSD y que el motor secundario es del tipo MSD, en la imagen 3.3 se muestran los factores de emisión escogidos de la sección 2 con sus respectivos factores de emisión, esto asumiendo que ambos usan RO como combustibles.

Modo Crucero	MSD / RO [g/kWh]	SSD / RO [g/kWh]
NOx	13,3	16,99
CO	1,1	0,49
NM VOC	0,2	0,29
SOx	9,9	9
NH3	0,003	0,0053
PM	0,5	1,3
CO2	683	620
CH4	0,004	0,006
N2O	0,031	0,031

Figura 3.3 : Factores de emisión para barcos en modo crucero para motores del tipo de velocidad media y lenta, en gramo de gas por kilowatt-hora de potencia.

Aplicando la metodología de la sección 2, los supuestos y el procedimiento recién explicado en esta sección se obtuvo el nivel de emisiones totales durante el modo crucero para los navíos que circulan en los puertos de Quintero. Los resultados se muestran en la imagen 3.4.

	Emisiones Totales [ton]
NOx	1,183,E+04
CO	4,777,E+02
NM VOC	1,969,E+02
SOx	3,406,E+01
NH3	3,473,E+00
PM	8,070,E+02
CO2	4,695,E+05
CH4	4,047,E+00
N2O	2,288,E+01

Figura 3.4 : Emisiones totales de los barcos circundantes en los puertos de Quintero en modo crucero, con el tonelaje de emisiones totales según el tipo de contaminante.

3.1.2 Nivel de emisiones Marítimas en Modo Maniobra

Para aplicar la ecuación de la cantidad de emisiones del modo maniobra se debe identificar la cantidad de tiempo que el barco toma en realizar el modo maniobra, este tiempo es el mismo que le toma al navío realizar una faena específica, estas faenas consideran maniobras como amarre, fondear a la gira, levar a la gira, abarloar, atracar, largarse, correrse y las operaciones inversas como desamarre. El inventario de barcos cuenta con el historial de todas las faenas realizadas por los barcos en los puertos de Quintero, especificando cual es la faena, el tipo de barco que la realiza, las fechas durante las cuales se realiza y la cantidad de barcos remolcadores utilizados para la faena. Una vez establecido el tiempo que tarda cada faena se puede aplicar la ecuación que determina la cantidad de emisiones por faena de modo maniobra, considerando tanto la cantidad de emisiones del barco de carga como la de los barcos remolcadores que lo asisten en la maniobra. Para los barcos remolcadores se asumió los mismos factores de carga que para los buques de carga, además se asume que estos operan con una potencia de 4000 kW para el motor principal y de 1000 kW para el motor auxiliar.

En la imagen 3.5 se muestra un extracto del inventario facilitado por la DIRECTEMAR donde se especifica el nombre de la nave que solicitó realizar la maniobra y el periodo de tiempo en que la realizó. En este caso la nave de carga general “Adelina” solicitó realizar un fondeo a la gira el 24 de

diciembre de 2023 y realiza esta faena entre las 5:12 y las 5:48 del mismo día, no requirió remolcadores para la faena.

NR_SOLICITUD	FC_SOLICITADA	FC_INICIO	FC_FIN	NOMBRE NAVE	TIPO NAVE	FAENA	NR_REMOLCADORES
8529431	24-12-2023 5:30	24-12-2023 5:12	24-12-2023 5:48	ADELINA	CARGA GENERAL	Fondear a la gira	0
8531722	27-12-2023 10:45	27-12-2023 10:45	27-12-2023 12:15	ADELINA	CARGA GENERAL	Atraque	2
8534454	29-12-2023 14:39	29-12-2023 14:30	29-12-2023 15:06	ADELINA	CARGA GENERAL	Desatraque	2

Figura 3.5 : Extracto de la base de datos del inventario de barcos para obtener el tiempo de maniobra.

Para el modo maniobra se utilizaron los factores emisión mostrados en la imagen 3.6, se consideró que ambos motores funcionan con RO, siendo el motor principal del tipo SSD y el motor secundario del tipo MSD.

M Maniobra	SSD / RO [g/kWh]	MSD / RO [g/kWh]
NOx	13,59	10,6
CO	0,99	2,2
NMVOG	0,59	0,4
SOx	9,9	10,9
NH3	0,0053	0,006
PM	2,6	1
CO2	682	752
CH4	0,012	0,008
N2O	0,031	0,031

Figura 3.6 : Factores de emisión para barcos en modo maniobra para motores del tipo de velocidad media y lenta, en gramo de gas por kilowatt-hora de potencia.

Aplicando la metodología de la sección 2, los supuestos y el análisis al inventario de barcos del puerto, se obtuvo el nivel de emisiones totales de los navíos durante el modo maniobra, los resultados de muestran en la imagen 3.7 para cada tipo de contaminante emitido.

	Emisiones Totales [ton]
NOx	1,911,E+02
CO	2,771,E+01
NM VOC	7,718,E+00
SOx	8,497,E-01
NH3	9,256,E-02
PM	2,665,E+01
CO2	1,172,E+04
CH4	1,557,E-01
N2O	5,019,E-01

Figura 3.7: Emisiones totales de los barcos circundantes en los puertos de Quintero en modo maniobra, con el tonelaje de emisiones totales según el tipo de contaminante

3.1.3 Nivel de emisiones Marítimas en Modo Puerto

El uso de la ecuación de la cantidad de emisiones del modo maniobra requiere identificar la cantidad de tiempo que el barco se mantiene detenido cerca del puerto o en modo puerto, para esto se debe identificar las faenas y los tiempos de estas faenas al igual que en el modo maniobra, pero con la diferencia de que se busca determinar la cantidad de tiempo que pasa el barco en puerto, es decir, la cantidad de tiempo que transcurre desde que termino de atracar hasta el momento en que este comienza a desatracar, esto aplicado también al amarre y desamarre. Una vez establecido el tiempo que pasa el barco detenido en el puerto se puede aplicar la ecuación que determina la cantidad de emisiones que este genera mientras está atracado o amarrado durante el modo puerto. Este cálculo no considera las emisiones que generan los barcos remolcadores durante modo puerto, considerando además de que estos no se usan mientras que el barco de carga está en modo puerto.

En la imagen 3.8 se muestra un extracto del inventario facilitado por la DIRECTEMAR donde se especifica el nombre de la nave petrolera “Adriatic Wave” que solicitó realizar algunas faenas puerto y cada una de estas faenas en un respectivo periodo de tiempo. En este caso la nave de carga general “Adriatic Wave” solicitó realizar un amarre al terminal marítimo el 29 de mayo de 2023 y realiza el desamarre el 31 de mayo de 2023. Se consideró el tiempo que el barco pasa estacionado en modo puerto como el periodo que transcurre desde el 29 de mayo a las 16:28 hasta el 31 de mayo a las 18:00 durante el año 2023.

NR_SOLICITUD	FC_SOLICITADA	FC_INICIO	FC_FIN	NOMBRE NAVE	TIPO NAVE	FAENA	NR_REMOLCADORES
8347280	28-05-2023 18:30	28-05-2023 19:12	28-05-2023 19:50	ADRIATIC WAVE	PETROLERO	Fondear a la gira	0
8347764	29-05-2023 16:00	29-05-2023 16:28	29-05-2023 19:30	ADRIATIC WAVE	PETROLERO	Amarre a Terminal Marítimo	2
8350118	31-05-2023 18:00	31-05-2023 18:00	31-05-2023 19:42	ADRIATIC WAVE	PETROLERO	Desamarre a Terminal Marítimo	2
8359079	12-06-2023 1:30	13-06-2023 1:30	13-06-2023 3:30	ADRIATIC WAVE	PETROLERO	Amarre a Terminal Marítimo	2
8359616	12-06-2023 19:00	12-06-2023 19:00	12-06-2023 20:30	ADRIATIC WAVE	PETROLERO	Desamarre a Terminal Marítimo	2

Figura 3.8 : Extracto de la base de datos del inventario de barcos para obtener el tiempo que los barcos están en modo puerto.

Para el modo puerto se utilizaron los factores emisión mostrados en la imagen 3.9, se consideró que ambos motores funcionan con RO, siendo el motor principal y el motor secundario del tipo MSD.

M puerto	MSD / RO [g/kWh]
NOx	14
CO	0,9
NM VOC	0,2
SOx	10,4
NH3	0,006
PM	0,5
CO2	722
CH4	0,004
N2O	0,031

Figura 3.9 : Factores de emisión para barcos en modo puerto para motores del tipo de velocidad media, en gramo de gas por kilowatt-hora de potencia.

Aplicando la metodología de la sección 2, los supuestos y el análisis al inventario de barcos del puerto se obtuvo que el nivel de emisiones totales de los navíos durante el modo puerto, los resultados de muestran en la imagen 3.10 para cada tipo de contaminante emitido.

	Emisiones Totales [ton]
NOx	9,108,E+02
CO	5,855,E+01
NM VOC	1,301,E+01
SOx	3,383,E+00
NH3	3,904,E-01
PM	3,253,E+01
CO2	4,697,E+04
CH4	2,602,E-01
N2O	2,017,E+00

Figura 3.10 : Emisiones totales de los barcos circundantes en los puertos de Quintero en modo puerto, con el tonelaje de emisiones totales según el tipo de contaminante.

3.1.4 Nivel de emisiones Marítimas Totales

Para el caso general se sumaron todas las emisiones de gases contaminantes, considerando los tres tipos de modos de operación a la vez. En la imagen 3.11 se presenta las emisiones totales emitidas por los barcos que circularon en el puerto de Quintero por toneladas y según el tipo de contaminante.

	Emisiones Totales [ton]
NOx	1,294,E+04
CO	5,640,E+02
NM VOC	2,176,E+02
SOx	3,830,E+01
NH3	3,956,E+00
PM	8,662,E+02
CO2	5,282,E+05
CH4	4,463,E+00
N2O	2,539,E+01

Figura 3.11 : Emisiones totales de los barcos circundantes en los puertos de Quintero de todos los modos, con el tonelaje de emisiones totales según el tipo de contaminante.

Al comparar las emisiones generadas por los barcos en los tres tipos de modo de operación se observó que la mayoría de ellas eran generadas por el modo crucero, cosa esperable ya que los trayectos más largos son abarcados en este modo. En cuanto a los otros modos se observa que el nivel de emisiones es mucho menor que el del modo crucero, representando en conjunto solo un 8,52% respecto al total, se resalta de que a pesar de la cantidad estas emisiones son muy bajas en comparación al modo crucero siguen siendo de importancia, ya que estas emisiones son a las que se exponen directamente las comunidades portuarias. A continuación se muestran los niveles de emisiones de los gases de mayor interés en forma gráfica, estos son NOx, CO2, PM y SOx.

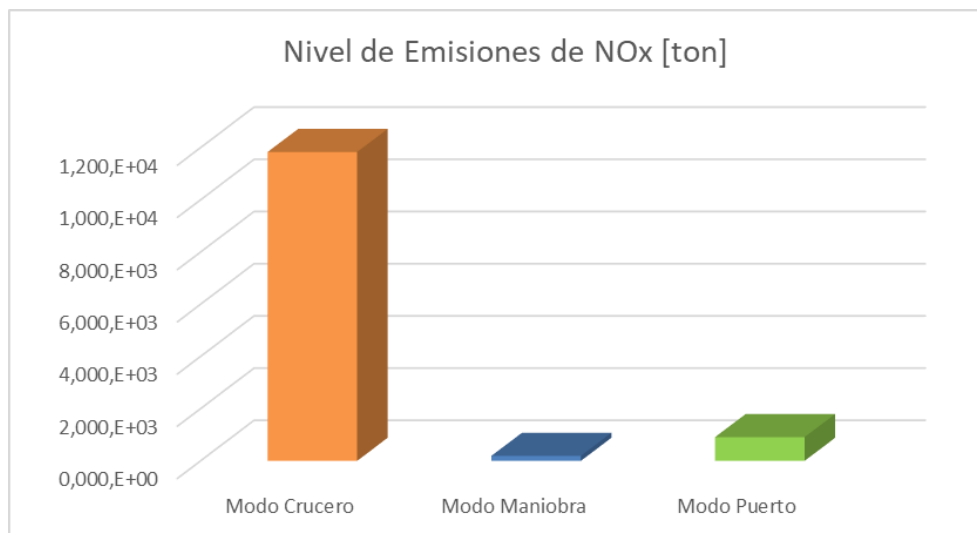


Figura 3.12 : Nivel de emisión de NOx para los tres modos de operación en toneladas.

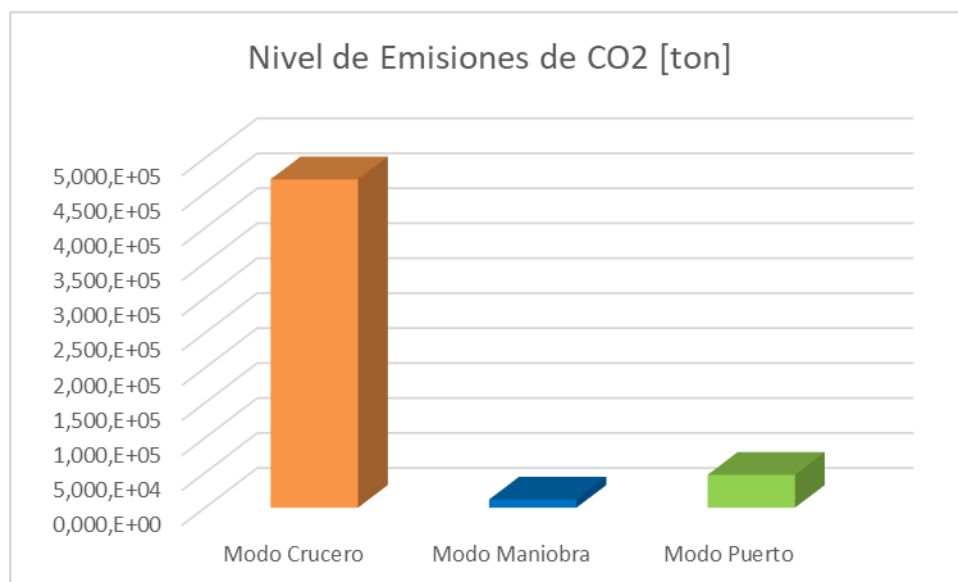


Figura 3.13 : Nivel de emisión de CO2 para los tres modos de operación en toneladas.

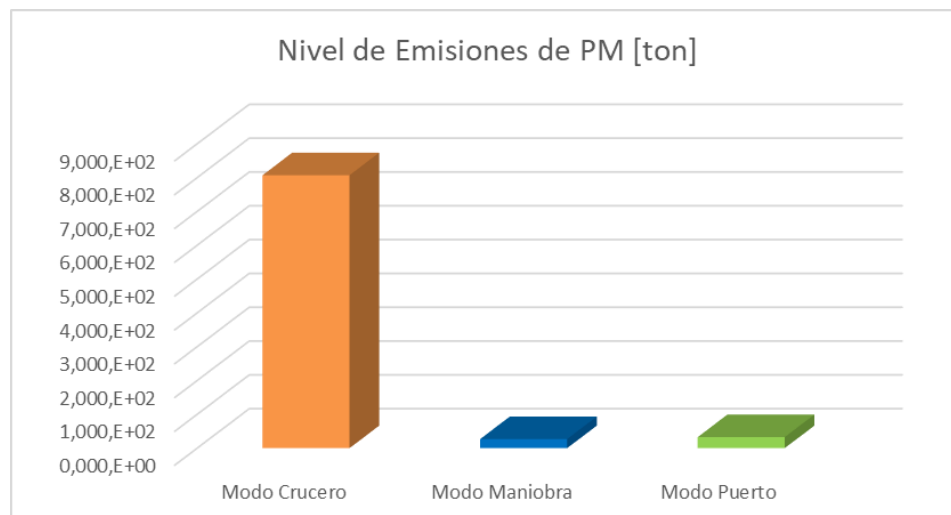


Figura 3.14 : Nivel de emisión de PM para los tres modos de operación en toneladas.

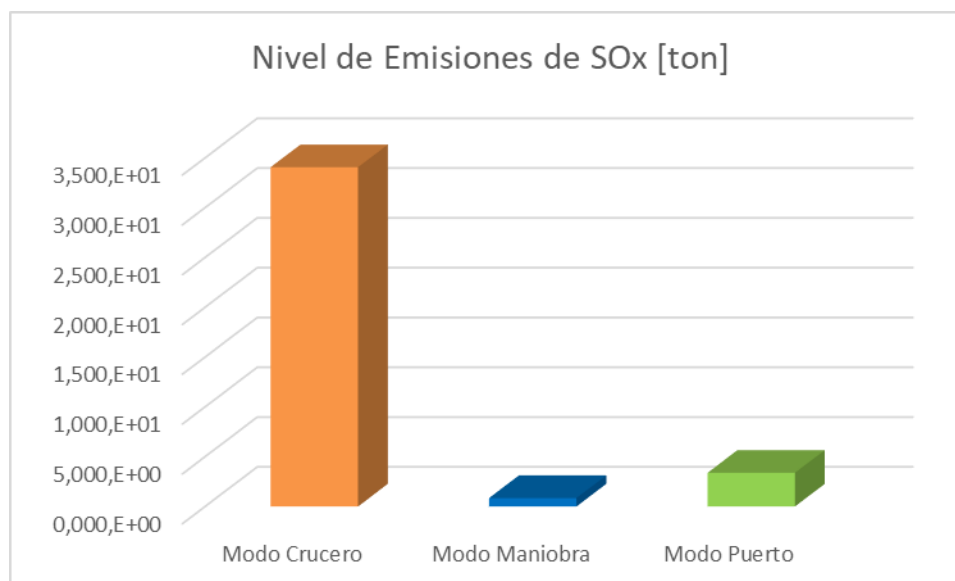


Figura 3.15 : Nivel de emisión de SOx para los tres modos de operación en toneladas.

3.2 Conclusiones del Capítulo

Se concluye de este capítulo que se pudo aplicar con éxito el tratamiento de la información, la metodología de cálculo y los supuestos propuestos en el capítulo 2, de manera de que se obtuvo una estimación aceptable de las emisiones que se producen en el puerto de Quintero en los tres modos de operación.

Se estimó que las emisiones generadas por los barcos en los tres tipos de modo de operación son en su mayoría generadas por el modo crucero. En cuanto a los otros modos se observa que el nivel de emisiones es mucho menor que el del modo crucero, representando en conjunto solo un 8,52% respecto al total. Las emisiones de los modos puerto y maniobra siguen aun así siendo relevantes, dado que las comunidades portuarias se exponen directamente a estas emisiones.

Al aplicar la metodología propuesta se obtuvo de que el transporte naviero de Quintero generó durante el 2023: 12.940 toneladas de óxidos nitrosos NO_x, 564 toneladas de monóxido de carbono, 217 toneladas de compuesto orgánicos volátiles distintos de metano, 38 toneladas de óxidos de azufre, 3,9 toneladas de amoníaco, 866 toneladas de material particulado, 528.200 toneladas de dióxido de carbono, 4 toneladas de metano y 25 toneladas de óxido nitroso N₂O.

En modo crucero el transporte naviero en los puertos de Quintero generó durante el 2023: 11.183 toneladas de óxidos nitrosos NO_x, 477 toneladas de monóxido de carbono, 196 toneladas de compuesto orgánicos volátiles distintos de metano, 34 toneladas de óxidos de azufre, 3,4 toneladas de amoníaco, 807 toneladas de material particulado, 469.500 toneladas de dióxido de carbono, 4 toneladas de metano y 22 toneladas de óxido nitroso N₂O.

En modo maniobra el transporte naviero en los puertos de Quintero generó durante el 2023: 191 toneladas de óxidos nitrosos NO_x, 27 toneladas de monóxido de carbono, 7,7 toneladas de compuesto orgánicos volátiles distintos de metano, 0,84 toneladas de óxidos de azufre, 0,09 toneladas de amoníaco, 26 toneladas de material particulado, 11.720 toneladas de dióxido de carbono, 0,15 toneladas de metano y 0,5 toneladas de óxido nitroso N₂O.

En modo puerto el transporte naviero en los puertos de Quintero generó durante el 2023: 910 toneladas de óxidos nitrosos NO_x, 58 toneladas de monóxido de carbono, 13 toneladas de compuesto orgánicos volátiles distintos de metano, 3,3 toneladas de óxidos de azufre, 0,39 toneladas de amoníaco, 32 toneladas de material particulado, 46.970 toneladas de dióxido de carbono, 0,26 toneladas de metano y 2 toneladas de óxido nitroso N₂O.

4 EFECTIVIDAD EN LA MITIGACIÓN EMISIONES

A continuación se muestra las soluciones de mitigación escogidas o recomendadas para su aplicación en los puertos de Quintero, de manera de reducir las emisiones en los 3 modos de operación. En conjunto con esto se entrega un cálculo de la reducción de las emisiones con las medidas de mitigación aplicadas. En el capítulo se recomienda las medidas según las proyecciones, simulaciones y comentarios de acuerdo las investigaciones recopiladas en la redacción de esta investigación, aplicando estas en las estimaciones de niveles de emisión realizadas para los puertos de Quintero. Se debe tener en consideración de que este análisis no considera en detalle un análisis económico ni político de la implementación de estas medidas. Al final del capítulo se realiza un análisis del desempeño de mitigación de estas medidas y que se puede concluir de las medidas aplicadas o de las tecnologías de mitigación en general.

4.1 Mitigación de emisiones en modo crucero

A continuación se muestra las soluciones de mitigación escogidas o recomendadas para su aplicación en el puerto de Quintero respecto al modo crucero, se separan según los tres tipos de soluciones: medidas de gestión, combustible alternativo o tecnologías.

4.1.1 Medidas de gestión en modo crucero

Al seleccionar los métodos de mitigación para el modo crucero se observa que en sí todos los métodos de gestión mencionados en la sección 1 son combatibles y recomendables para la reducción de las emisiones. Sin embargo, la implementación de todos estos métodos al mismo tiempo supone varias complicaciones a la hora de estimar su comportamiento a la hora de reducir las emisiones. Además las fuentes de información no ofrecen los suficientes datos ni contexto para estimar como se reducirían las emisiones al aplicar estas medidas

Se destaca dentro de las medidas de mitigación de gestión al “virtual management” la cual busca en general aumentar la productividad y disponibilidad de los puertos, un sistema de análisis meteorológico para adaptarse a climas adversos y la reducción de la velocidad de los barcos. Se considera una idea innovadora para la reducción de emisiones debido a su carácter preventivo, ya que propone un uso más amplio de la información. Sin embargo, genera algunas dudas respecto a cómo se comportaría este sistema si el pronóstico climático falla, ya que al ser la meteorología un área de

probabilidades cabe la chance de que pronósticos erróneos podrían perjudicar la disponibilidad y productividad.

En el caso de la reducción de la velocidad de los barcos se podría aprovechar esta medida por medio de la implementación de la gestión “virtual management”, de manera de que se puedan asignar velocidades reducidas a los barcos y que también se disminuya la hotelización de los barcos de manera sincronizada. Esta reducción de velocidad se debería evaluar según cada caso si es conveniente, de manera de no afectar la programación del barco, dañar su motor o generar un consumo innecesario de combustible.

Respecto a la medida “Diseño y condiciones de operación del barco” se resaltan el potencial como modelo de gestión el mantener las condiciones óptimas de operación a los buques tanto por eficiencia, costo y reducción de emisiones, ya que estos enfoques de manejo de buques son intuitivos y aplicables a todos los casos. En cuanto al diseño de los barcos como las hélices o casco es difícil en sí de implementar, ya que en general no se tiene la opción de acceder a barcos con diseños específicos o la creación de los mismos, sin embargo, no se descarta la posibilidad de que esto se pueda realizar, ya que otras medidas de mitigación como la gestión verde proponen que se establezca colaboración y comunicación para desarrollar estos proyectos ecológicos en conjunto. Se resalta el “Peak Shaving” y WHRS como medidas de ahorro de combustible y reducción de emisiones flexibles para su implementación y desarrollo.

4.1.2 Combustibles alternativos en modo crucero

Dentro de las medidas de mitigación la más relevante es la selección de un combustible alternativo, ya que este acapara la mayoría del potencial de reducción de las emisiones. Si bien hay muchas opciones ecológicas prometedoras como el hidrogeno, amoniaco y biocombustibles, estos combustibles están lejos de ser realistas debido a las problemáticas que suponen. Por ejemplo, el hidrogeno verde es una fuente de energía muy limpia que promete ser el futuro del transporte, pero su densidad energética, costos y almacenamiento sugieren que aún carece de madurez tecnológica y necesita más investigación para ser una solución viable. Otros casos son biocombustibles, amoniaco y diésel más limpio, los problemas que suelen tener es que el campo de investigación de su desempeño en buques es muy acotado o que su distribución y comercialización es muy baja o esta apenas en desarrollo. Dentro de estos combustibles destaca la mezcla entre amoniaco e hidrogeno verde, este es

uno de los combustibles más limpios y por tener una madurez tecnológica mayor a del hidrogeno verde, lo que la vuelve la mejor opción a largo plazo.

Los 2 combustibles alternativos más utilizados para reemplazar al diésel marino son el metanol y el LNG, donde el metanol a pesar de ser más fácil de almacenar es más contaminante que el LNG. El LNG destaca por ser un combustible más limpio que el diésel y el metanol, el cual se quiere implementar ampliamente en muchos puertos del mundo (Martínez-López et al., 2021), siendo la mejor en cuanto a disponibilidad, información, costo (Law et al., 2022) y emisiones (Acciaro M et al., 2014). Se destaca la disponibilidad de LNG en los puertos de Quintero, ya que se cuenta con una terminal de recepción, descarga, almacenamiento y regasificación de Gas Natural Licuado (GNL), por lo que se contaría con abastecimiento de combustible en la misma zona. Si bien el GNL no resalta mucho por las reducciones de CO₂ con solo un 20% aproximadamente (Martínez-López et al., 2021), así que se le considera a esta medida de combustible como la mejor solución a corto plazo.

El combustible ideal para comenzar una transición para la reducción de las emisiones sería el amoniaco con hidrogeno, sin embargo, es todavía un área de estudio en desarrollo, por lo que se recomienda el realizar una transición al LNG como una medida a corto plazo para poder reducir las emisiones, para así eventualmente implementar el amoniaco con hidrogeno como una solución definitiva.

No se recomienda el uso de combustibles emulsionados debido al daño que producen en la estructura del motor.

De manera complementaria a un combustible alternativo esta la electrificación o hibridación, es una opción recomendable para la reducción de emisiones y ahorro de combustible, para esto se requeriría de la implementación de sistemas eléctricos dentro de los barcos los cuales implican un alto costo e infraestructura de carga en tierra, como lo que es el sistema “On Shore Power”. Al ser Chile un país que cuenta con una gran cantidad de energía limpia en su red central, la electrificación de las embarcaciones es una oportunidad de proporcionar energía eléctrica verde al puerto de Quintero, de modo de reducir el consumo de combustible y mitigar emisiones.

4.1.3 Tecnologías en modo crucero

Dentro de las tecnologías hay varias opciones interesantes de implementación para la reducción de emisiones, tecnologías como la recirculación de gases de escape, sistemas SCR, ciclo de Miller, etc. Estas opciones son sumamente recomendables a la hora de buscar métodos para la reducción de emisiones debido a que parecen aplicables en muchos casos y poseen potencial, aunque de estas se descartan el depurador el DWI, ya que estos métodos de uso de agua en el combustible son conocidos dañar el motor, generando varios problemas de estructura y mantención. También se debe considerar el caso del depurador de Azufre, donde si bien es recomendable y efectivo en muchos casos, se sugiere el uso de un combustible bajo en azufre como una medida principal para la reducción de SOx.

En cuanto a la tecnología eólica, solar y mareomotriz se consideran opciones innovadoras y con potencial, pero en términos de ganancia energética no se consideran como opciones muy robustas, además de que su costo de inversión es muy alto. Se debe considerar también que su implementación sido probada solamente en prototipos de barcos pequeños, por lo que no se conoce o no se tiene antecedente del desempeño de estas tecnologías a gran escala o en buques grandes, además de que se tiene en algunos casos claros problemas de implementación en embarcaciones grandes como la energía solar, esto respecto a cómo colocar y conectar los paneles. Otra desventaja visible de estas fuentes de energía es que son fuertemente dependientes de las condiciones meteorológicas, por lo que no son del todo confiables. Estas medidas se pueden tener en cuenta como un complemento para brindar energía a un barco en un papel secundario por medio de sistemas híbridos, pero no se debe considerarlas como medidas principales para la reducción de las emisiones.

Respecto a la energía nuclear destaca por sus bajas emisiones y densidad energética, como se mencionó en la sección 1, pero es improbable su implementación debido a “consideraciones políticas”, sobre todo por el periodo de tensión política actual. El sector nuclear puede contribuir a la industria naviera por medio de plantas de energía en tierra, como generación de hidrogeno o dando energía eléctrica al sistema “On Shore Power”.

Otra tecnología mencionada en la sección 1 es las velas de cometa, esta parece una propuesta elegante debido a su aparente bajo costo de implementación y el uso de fuertes corrientes de viento. Una de las principales desventajas visibles de esta herramienta es que al igual que la energía solar, eólica y mareomotriz depende de las condiciones meteorológicas, siendo más específico hay una dependencia a la dirección de la corriente del viento. Se considera recomendable evaluar el uso de las

velas cometa debido a su bajo costo económico, ya que puede brindar una reducción en el consumo del combustible y de las emisiones de manera una manera práctica y de bajo riesgo.

La tecnología mencionada como sección 1 como lubricado por aire es un diseño novedoso, pero que en términos prácticos debe ser difícil de implementar o difícil de encontrar en el mercado, ya que no se encuentra en el diseño común de los buques y que además es difícil que un proveedor esté dispuesto a fabricarlo debido al diseño complejo, por lo tanto, no se recomienda considerar esta herramienta.

4.2 Mitigación de emisiones en modo maniobra

Para el modo maniobra se consideran de la misma manera las recomendaciones para el modo crucero, donde la implementación de las medidas es igualmente plausible tanto para el modo crucero como el modo maniobra.

Dentro de las medidas que destacan para la reducción de emisiones en el modo maniobra está el “automated mooring” o amarrado automático. Esta tecnología permite la reducción del tiempo de maniobra de los barcos en media hora, esto se estima a través de la consideración de que el tiempo de amarre y desamarre de un barco es de alrededor de media hora (Díaz-Ruiz-Navamuel et al., 2018), mientras que el amarre automático tarda menos de un minuto. Esta medida resalta gracias a que reduce las emisiones al disminuir el tiempo de maniobra del buque de carga y los barcos remolcadores, además de facilitar una maniobra tan riesgosa y tardía en la industria portuaria. El AMS se considera no solo por su sistema innovador sino por también tener las ventajas que posee cualquier sistema neumático como la disponibilidad de aire, bajos costos, ventajas de almacenamiento, seguridad, entre otras.

4.3 Mitigación de emisiones en modo puerto

En este inciso se muestra las soluciones de mitigación escogidas o recomendadas para su aplicación en el puerto de Quintero respecto al modo puerto, se separan según los 2 tipos de soluciones: medidas de gestión o tecnologías.

4.3.1 Medidas de gestión en modo puerto

La implementación de estrategias de gestión verde es una de las herramientas principales para alcanzar la sostenibilidad y un entorno verde. Esto se debe a que no se limita solamente a medidas concretas para reducir las emisiones, sino a implementar un régimen de gestión y trabajo integral el cual este continuamente buscando soluciones ambientales y como mejorarlas. Además busca formar una comunidad de personas del entorno portuario para encontrar estas soluciones de manera conjunta para cumplir los estándares de las distintas comunidades y gobiernos. Se destaca esta metodología ya que la búsqueda de soluciones no debe limitarse solo a medidas fijas en el tiempo, sino que debe ser una búsqueda continua de mejora y aprendizaje de manera de poder solucionar las problemáticas medioambientales por medio de una estándar de administración que actúe con una visión amplia y acción constante. La comunidad de un entorno sostenible debe ser capaz de establecer objetivos en común y colaborar en conjunto, de manera de adaptarse a las necesidades e intereses de otros y alcanzar un beneficio mutuo. Idealmente se recomienda el implementar esta metodología a los 3 métodos de operación de los barcos y si fuera posible a toda la administración portuaria en general.

Como algo secundario es aplicar medidas de reducción de emisiones en la infraestructura de los puertos, si bien estas medidas no se aplican directamente en los barcos, si es un parte de la infraestructura que aloja a los mismos. Estas medidas son principalmente tecnologías de iluminación verdes como las luces LED o la energía solar. Se recomienda la implementación de estos sistemas como algo complementario ya que el enfoque de esta investigación refiere principalmente al funcionamiento de los buques.

4.3.2 Tecnologías en modo puerto

Una tecnología muy usada en varios puertos del mundo para la reducción de emisiones en el “On Shore Power” o electricidad en tierra (López et al., 2023). Esta herramienta se ha masificado en países desarrollados debido a su efectividad, ya que esta se considera como parte del plan de descarbonización en Europa (Kim et al., 2023). Uno de los problemas de la implementación de esta herramienta es el alto costo del procedimiento de actualización de la infraestructura eléctrica. El despliegue de OPS involucra a múltiples partes interesadas, incluidos gobiernos, armadores, autoridades portuarias y operadores portuarios, por lo que el fomentar la implementación de estas herramientas puede ser problemático en cuanto a lo político. A pesar de ello, se considera el OPS como una medida sumamente recomendable para su implementación, ya que si bien se puede utilizar

barcazas más ecológicas en su lugar, una fuente de corriente eléctrica en puerto se podría usar tanto para alimentar barcos híbridos, alimentar AE de buques grandes y en general para un ahorro en el uso de combustible de cualquier tipo, aunque estos beneficios mencionados pueden depender de la comparación del costo del combustible respecto a la tarifa eléctrica. Se debe tener en consideración de que la electricidad promocionada al OPS debe ser idealmente verde, ya que en el caso contrario las emisiones reducidas en el puerto serían atribuidas a una planta de energía del SEN para obtener esa energía, por lo que solo se cambiaría la fuente emisora. Aunque una electrificación verde se cubre a largo plazo con el plan de descarbonización de la red de energía eléctrica de Chile.

4.4 Resultados generales de mitigación de emisiones

A rasgos generales hay un muchas medidas las cuales se pueden implementar para la reducción de las emisiones, pero el estimar el comportamiento de todas estas medidas simultáneamente puede ser muy complicado ya que no se conoce como se comportan estas medidas cuando se aplican simultáneamente, además de que muchas veces las investigaciones proporcionan información de cómo se reduce el consumo de combustibles pero no como se comporta la reducción de las emisiones o incluso a veces no se da información en lo absoluto de su desempeño. Cabe resaltar también lo que se menciona en el inciso 4, muchas medidas de mitigación pueden ser muy limpias, pero están lejos de tener una implementación factible o están lejos de contar con beneficios económicos, políticos o tecnológicos mínimos para poder ser realmente consideradas. Si bien el alcance de esta investigación no realiza un análisis extenso en términos económicos, políticos o técnicos, se consideró estas variables en base a la información y opiniones que se dan en las investigaciones.

Para la estimación de la reducción de emisiones en los puertos de Quintero se consideró la implementación de 3 medidas: el uso de LNG con un sistema híbrido eléctrico para la sustitución del diésel marino, la instalación del sistema OPS y la instalación del sistema de amarrado automático (AMS). Se recuerda que no se realizó un análisis profundo en aspectos económicos ni políticos ni técnicos de la factibilidad de la aplicación de estas medidas, solamente son las que se consideraron como las más viables para su implementación en los puertos. A continuación se enseñan la reducción de las emisiones estimada con estas 3 medidas de mitigación, para esto se aplicó a las emisiones estimadas en la sección 3 un coeficiente de reducción asociado a cada medida de mitigación aplicada. Para obtener estos coeficientes se utilizó las investigaciones de (Martínez-López et al., 2021) y (Pérez Osses et al., 2022) para el uso de LNG, a (Spengler & Tovar, 2021) y (Pérez Osses et al., 2022) para el OPS y a (Díaz-Ruiz-Navamuel et al., 2018) y (Ortega Piris et al., 2018) para el amarrado

automático. Los coeficientes de reducción de cada medida según la bibliografía se observan en la imagen 4.1.

Coef. de reducción	OPS (Energía en tierra)	AMS (Amarrado automático)	Comb. Alternativo (LNG/híbrido)
NOx	49,20%	31,99%	77,25%
CO	27,00%	31,96%	25,00%
NM VOC	27,00%	31,99%	25,00%
SOx	63,20%	31,98%	97,53%
NH3	27,00%	31,98%	25,00%
PM	39,40%	32,01%	87,76%
CO2	57,20%	31,98%	21,10%
CH4	27,00%	31,99%	25,00%
N2O	27,00%	31,98%	25,00%

Figura 4.1 : Coeficientes de reducción de emisiones para cada medida de mitigación escogida.

Al aplicar las medidas de reducción en cada uno de los modos de operación y para cada uno de los gases contaminantes se obtienen los resultados mostrados en las imágenes 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5, en ellas se muestra las emisiones totales generadas por los barcos durante sus respectivos modos de operación junto con el nivel de emisiones reducido que se alcanza gracias a las medidas de mitigación, adicionalmente se entrega un porcentaje de reducción que se alcanza respecto al nivel original. Estas medidas no se aplican igual para todos los modos, es decir, el OPS se aplicó solamente para el modo puerto ya que actualmente puede haber restricciones técnicas para aplicarlo en modo maniobra, el amarrado automático solo reduce las emisiones durante el modo maniobra y el combustibles sustituto LNG con sistema híbrido eléctrico reduce emisiones en los tres modos de operación.

	Emisiones Totales [ton]	Emisiones Reducidas [ton]	R%
NOx	1,183,E+04	2,693,E+03	77,25%
CO	4,777,E+02	3,583,E+02	25,00%
NM VOC	1,969,E+02	1,476,E+02	25,00%
SOx	3,406,E+01	8,411,E-01	97,53%
NH3	3,473,E+00	2,605,E+00	25,00%
PM	8,070,E+02	9,882,E+01	87,76%
CO2	4,695,E+05	3,704,E+05	21,10%
CH4	4,047,E+00	3,035,E+00	25,00%
N2O	2,288,E+01	1,716,E+01	25,00%

Figura 4.2 : Emisiones totales del modo crucero junto con las emisiones reducidas de cada gas, incluye también el porcentaje de reducción efectivo por contaminante.

	Emisiones Totales [ton]	Emisiones Reducidas [ton]	R%
NOx	1,911,E+02	2,958,E+01	84,52%
CO	2,771,E+01	1,414,E+01	48,97%
NMVOC	7,718,E+00	3,936,E+00	48,99%
SOx	8,497,E-01	1,427,E-02	98,32%
NH3	9,256,E-02	4,722,E-02	48,98%
PM	2,665,E+01	2,218,E+00	91,67%
CO2	1,172,E+04	6,288,E+03	46,33%
CH4	1,557,E-01	7,939,E-02	48,99%
N2O	5,019,E-01	2,560,E-01	48,99%

Figura 4.3 : Emisiones totales del modo maniobra junto con las emisiones reducidas de cada gas, incluye también el porcentaje de reducción efectivo por contaminante.

	Emisiones Totales [ton]	Emisiones Reducidas [ton]	R%
NOx	9,108,E+02	1,053,E+02	88,44%
CO	5,855,E+01	3,206,E+01	45,25%
NMVOC	1,301,E+01	7,124,E+00	45,25%
SOx	3,383,E+00	3,074,E-02	99,09%
NH3	3,904,E-01	2,137,E-01	45,25%
PM	3,253,E+01	2,414,E+00	92,58%
CO2	4,697,E+04	1,586,E+04	66,23%
CH4	2,602,E-01	1,425,E-01	45,25%
N2O	2,017,E+00	1,104,E+00	45,25%

Figura 4.4 : Emisiones totales del modo puerto junto con las emisiones reducidas de cada gas, incluye también el porcentaje de reducción efectivo por contaminante.

	Emisiones Totales [ton]	Emisiones Reducidas [ton]	R%
NOx	1,294,E+04	2,828,E+03	78,14%
CO	5,640,E+02	4,045,E+02	28,28%
NMVOC	2,176,E+02	1,587,E+02	27,06%
SOx	3,830,E+01	8,861,E-01	97,69%
NH3	3,956,E+00	2,866,E+00	27,56%
PM	8,662,E+02	1,035,E+02	88,06%
CO2	5,282,E+05	3,926,E+05	25,67%
CH4	4,463,E+00	3,257,E+00	27,02%
N2O	2,539,E+01	1,852,E+01	27,08%

Figura 4.5 : Emisiones totales de todos los modos de operación junto con las emisiones reducidas de cada gas, incluye también el porcentaje de reducción efectivo por contaminante.

Cuando se compara las emisiones la reducción de emisiones de los gases más relevante (NOx, CO2, PM Y SOx) se observa una gran reducción entre un 70 y un 99 por ciento de las emisiones totales para todos los gases con excepción del CO2, cosa relevante ya que es uno de los gases más

influyentes en el efecto invernadero. En las imágenes 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 se realiza un comparativa gráfica de los niveles de emisión para los 4 gases contaminante mencionados, comparando el nivel inicial de emisiones comparado con el nivel reducido para cada modo de operación.

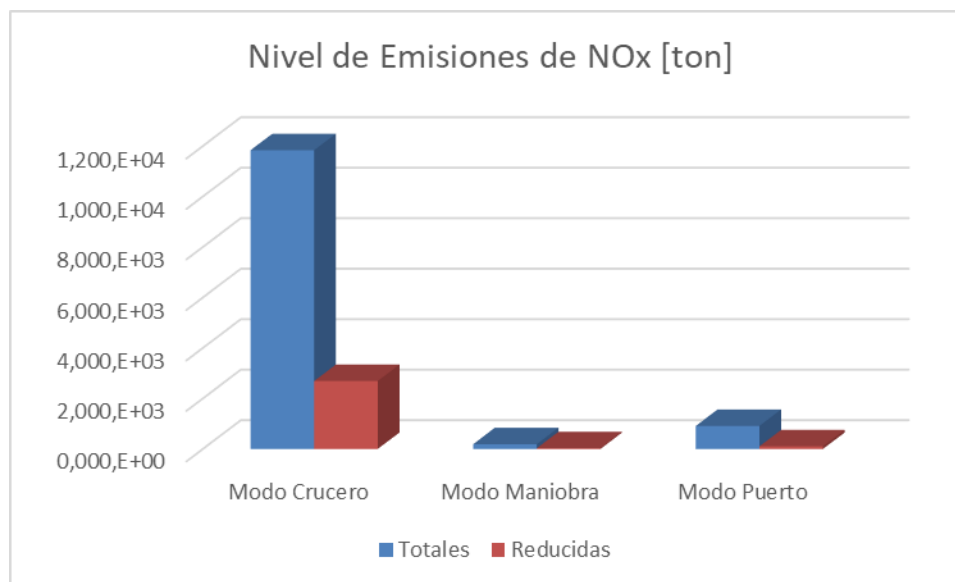


Figura 4.6 : Nivel de emisiones de NOx totales en comparación a las reducidas para cada uno de los modos de operación.

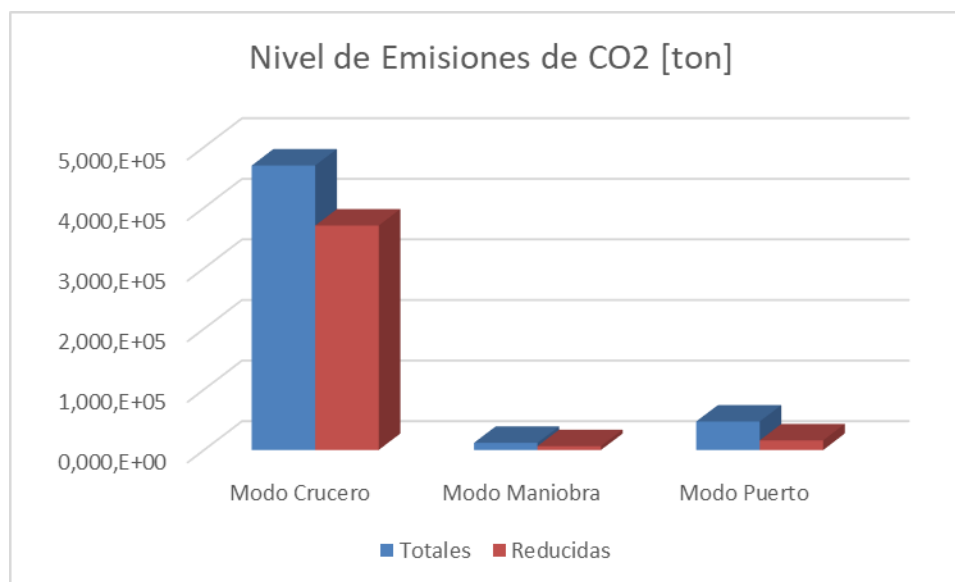


Figura 4.7 : Nivel de emisiones de CO2 totales en comparación a las reducidas para cada uno de los modos de operación.

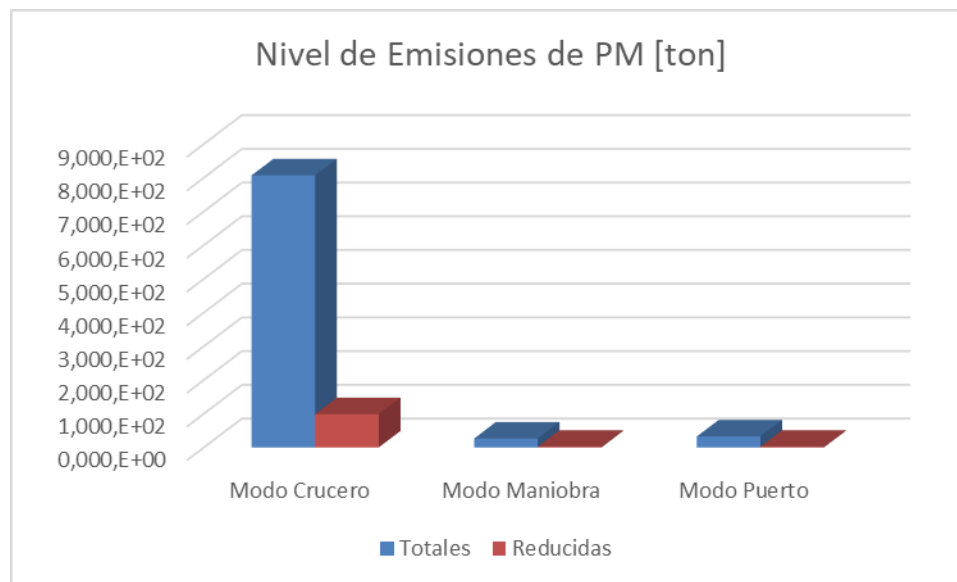


Figura 4.8 : Nivel de emisiones de PM totales en comparación a las reducidas para cada uno de los modos de operación.

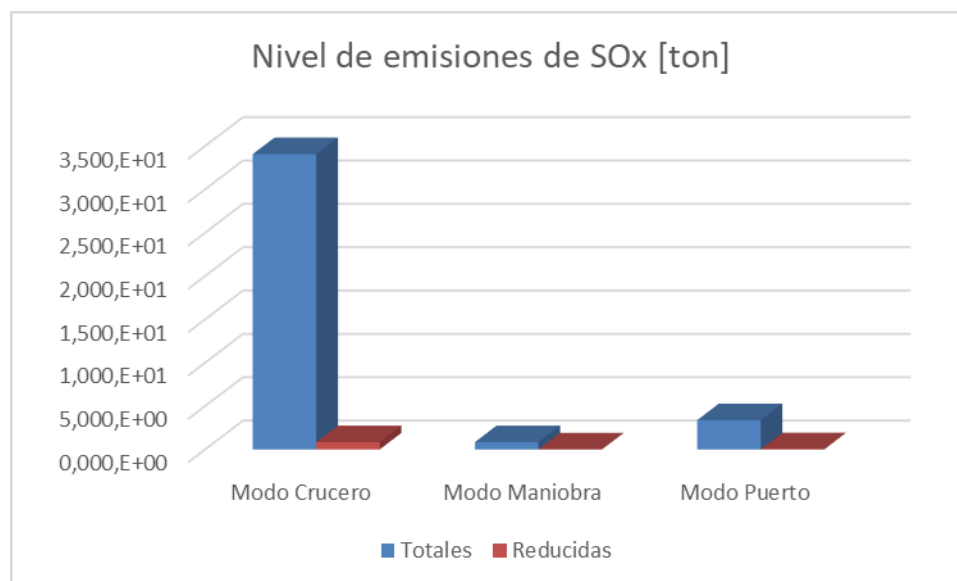


Figura 4.9 : Nivel de emisiones de SOx totales en comparación a las reducidas para cada uno de los modos de operación.

4.5 Conclusiones del Capítulo

Al comparar las distintas medidas de mitigación recopiladas de la literatura académica se encontró en el panorama general de que muchas de estas medidas tienen un considerable potencial de mitigación, sin embargo presentan problemas a la hora de ser evaluadas en un panorama teórico o aplicadas en la práctica. Esto se debe a que los estudios o investigaciones que se tiene de estas herramientas son muy acotados o no cuenta con los antecedentes y datos suficientes para ser evaluados de manera teórica o práctica. De la misma manera, estas herramientas también suelen estar restringidas a su poca viabilidad respecto a su implementación o aplicación, esto debido que por temas económicos, políticos o técnicos pueden ser muy complejos o de plano inviables. Si bien el alcance de esta investigación no realiza un análisis extenso en términos económicos, políticos o técnicos, se consideró en base a la información que se posee la factibilidad en estos aspectos.

Considerando el alcance que se propone para esta investigación, se recomienda la implementación del uso de gas licuado (LNG) con un sistema híbrido eléctrico, la instalación del sistema On Shore Power (OPS) y la instalación del sistema de amarrado automático (AMS) como un plan de mitigación de emisiones transitorio competente para alcanzar un nivel menor de gases contaminantes en comparación al nivel de gases contaminantes actual estimado. Al estimar el porcentaje de reducción de estas medidas aplicadas a los tres modos de operación se obtuvo: 78,14% de óxidos nitrosos NOx, 28,28% de monóxido de carbono, 27,06% de compuesto orgánicos volátiles distintos de metano, 97,69% de óxidos de azufre, 27,56% de amoníaco, 88,06% de material particulado, 25,67% de dióxido de carbono, 27,02% toneladas de metano y 27,08% toneladas de óxido nitroso N₂O.

Al aplicar las medidas de mitigación propuestas se obtuvo que el transporte naviero en los puertos de Quintero, en comparación al año 2023, podría disminuir sus emisiones a estos niveles: 2828 toneladas de óxidos nitrosos NOx, 404 toneladas de monóxido de carbono, 158 toneladas de compuesto orgánicos volátiles distintos de metano, 0,88 toneladas de óxidos de azufre, 2,8 toneladas de amoníaco, 103 toneladas de material particulado, 392.600 toneladas de dióxido de carbono, 3,2 toneladas de metano y 18 toneladas de óxido nitroso N₂O.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la sección de final de la investigación se concluirá entorno a los resultados finales de la investigación y si se lograron cumplir los objetivos propuestos para esta. Además se incluirán las recomendaciones generales de cómo se debería abordar la mitigación de emisiones en el puerto de Quintero de que medidas o tecnologías deberían aplicarse, junto con qué perspectiva debería desarrollarse esta implementación.

5.1 Conclusión general

El objetivo general de esta investigación es realizar un estudio de medidas para la mitigación de emisiones contaminantes producidas por embarcaciones marítimas en los puertos de Quintero.

Al realizar una revisión en la literatura académica se reconoció la relevancia que tiene el sector de transporte naviero, ya que este transporta entre un 80% y un 90% del comercio internacional. Se reconoce la importancia y el rol el transporte naviero, sector que debe responder a la presión política, social, económica y a los incentivos para implementar medidas ambientalistas, de manera de reducir en lo posible el 3% de las emisiones globales totales que genera. Al revisar investigaciones y estudios académicos entorno a las tecnologías de la innovación verde para poder reducir las emisiones contaminantes se recopiló un total de 24 de medidas de mitigación que fueron clasificadas en 5 grupos según su campo de aplicación.

Se estableció la información técnica más importante para a poder analizar y reconocer los aspectos más relevantes para la base de datos disponible, de manera de poder proponer y aplicar una metodología de cálculo, esta considera información de la EEA, SMED y ENTEC UK. En la investigación se estableció los pasos y las consideraciones necesarias para poder estimar las emisiones con la información y herramientas disponibles: considerando el boletín estadístico de la DIRECTEMAR, el inventario de barcos de AMBIOSIS, la bibliografía y el sitio Sea Rates.

Al aplicar la metodología propuesta se obtuvo de que el transporte naviero en los puertos de Quintero, generó durante el 2023: 12.940 toneladas de óxidos nitrosos NO_x, 564 toneladas de monóxido de carbono, 217 toneladas de compuesto orgánicos volátiles distintos de metano, 3,8 toneladas de óxidos de azufre, 3,9 toneladas de amoniaco, 862 toneladas de material particulado, 528.200 toneladas de dióxido de carbono, 4,4 toneladas de metano y 25 toneladas de óxido nitroso N₂O. De las emisiones generadas por lo barcos en los tres tipos de modo de operación se observó que

la mayoría de ellas eran generadas por el modo crucero. En cuanto a los otros modos se observa que el nivel de emisiones es mucho menor que el del modo crucero, representando en conjunto solo un 8,52% respecto al total.

Cuando se comparó las distintas medidas de emisión recopiladas en la literatura académica se encontró en el panorama general de que muchas de estas medidas tienen un considerable potencial de mitigación, sin embargo presentan problemas a la hora de ser evaluadas en un panorama teórico o aplicadas en la práctica, esto se debe a falta de información o que por temas económicos, políticos o técnicos pueden ser muy complejas o de plano inconvenientes de aplicar. Las medidas que se consideraron más convenientes fueron la implementación del uso de gas licuado (LNG) con un sistema híbrido eléctrico, la instalación del sistema On Shore Power (OPS) y la instalación del sistema de amarrado automático (AMS) como un plan de mitigación de emisiones transitorio competente para alcanzar un nivel menor de gases contaminantes. Al aplicar estas medidas a la estimación de emisiones marítimas generales del año 2023 que consideran los tres modos de operación, se obtuvo que los niveles de reducían a: 2828 toneladas de óxidos nitrosos NO_x, 404 toneladas de monóxido de carbono, 158 toneladas de compuesto orgánicos volátiles distintos de metano, 0,88 toneladas de óxidos de azufre, 2,8 toneladas de amoníaco, 103 toneladas de material particulado, 392.600 toneladas de dióxido de carbono, 3,2 toneladas de metano y 18 toneladas de óxido nitroso N₂O.

5.2 Conclusiones específicas

En esta investigación se presenta en detalle la metodología con que se aborda la información disponible respecto al transporte marítimo y como es tratada para el desarrollo de estimaciones sobre el nivel de actividad y emisiones producidas, dentro del ámbito nacional e internacional. Incluye principalmente información con la cual reconocer los distintos tipos de embarcaciones y sus características, el análisis de la información de movilización de buques, las relaciones de cálculo para estimar emisiones, la herramienta de georreferenciación utilizada y los supuestos o consideraciones con las que se usa la metodología.

Se introducen los conceptos bases con los cuales se va a efectuar el cálculo de las emisiones y el análisis de sus comportamientos. Se detalla las principales características de un navío como potencia del motor principal, potencia del motor auxiliar, velocidad del motor, el tipo de combustible que usa, el tipo de embarcación de acuerdo a la función que desempeña y los modos de operación de acuerdo a los cuales estos funcionan.

Por otro lado, también se muestra cómo se efectuó el cálculo de las emisiones para el caso de estudio. Se cubren 2 tópicos: los factores de emisión que establecen una relación entre el gas emitido con la energía utilizada y las ecuaciones generales que obtienen la cantidad de emisiones emitidas según los distintos factores relevantes para el cálculo.

Se entrega la metodología de georreferenciación con la que se obtuvieron distancias entre dos locaciones de planeta.

Se establecen los supuestos principales que se aplicaron para el uso de la metodología mencionada. En esta parte se mencionan las simplificaciones y condiciones específicas que se decidieron tomar para que los cálculos sean en lo posible más prácticos y precisos.

Se obtiene la información más relevante para poder determinar una estimación de las emisiones, donde se reconocen los cinco datos más importantes para identificar un buque, estos son: tipo de motor, velocidad de motor, tipo de combustible, tipo de embarcación y modo de operación.

Se determina además las bases de datos que se considera para la estimación, siendo estas el boletín estadístico de la DIRECTEMAR e inventario de barcos de Quintero facilitado por AMBIOSIS S.A. Se concluye que esta información debe ser manejada de forma previa al cálculo, de manera de establecer que se cuenta con la información suficiente para llevar el cabo en la estimación, de manera de poder establecer los debidos supuestos y/o reconocer los aspectos más relevantes de esta información.

En la metodología de cálculo mencionada se establece por medio de ecuaciones de emisiones totales y factores de emisión una forma práctica y confiable para poder determinar las emisiones que se generan con los barcos de Quintero, información que puede relacionarse de manera directa con la base de datos.

Se encuentra que la herramienta Sea Rates permite tanto corroborar como determinar la georreferenciación de las locaciones de interés.

Se concluye que la metodología propuesta en el capítulo no se puede aplicar directamente, sino que requiere que se tomen algunas consideraciones para poder aplicarlas al caso de estudio, estos supuestos consideran casos como información faltante, simplificación de los cálculos y precisión de

los cálculos. Estos supuestos consideran temas como tipos de barcos considerados, factores de carga, tipo de combustible utilizar en general, tipo de velocidad para los motores, entre otros.

Se concluye que se pudo aplicar con éxito el tratamiento de la información, la metodología de cálculo y los supuestos propuestos en el capítulo 2, de manera de que se obtuvo una estimación aceptable de las emisiones que se producen en el puerto de Quintero en los tres modos de operación.

Se observó de las emisiones generadas por los barcos en los tres tipos de modo de operación que la mayoría de ellas eran generadas por el modo crucero. En cuanto a los otros modos se observa que el nivel de emisiones es mucho menor que el del modo crucero, representando en conjunto solo un 7,84% respecto al total.

Al aplicar la metodología propuesta se obtuvo de que el transporte naviero en los puertos de Quintero generó durante el 2023: 12.940 toneladas de óxidos nitrosos NO_x, 564 toneladas de monóxido de carbono, 217 toneladas de compuesto orgánicos volátiles distintos de metano, 3,8 toneladas de óxidos de azufre, 3,9 toneladas de amoníaco, 862 toneladas de material particulado, 528.200 toneladas de dióxido de carbono, 4,4 toneladas de metano y 25 toneladas de óxido nitroso N₂O.

En modo crucero el transporte naviero en los puertos de Quintero generó durante el 2023: 11.183 toneladas de óxidos nitrosos NO_x, 477 toneladas de monóxido de carbono, 196 toneladas de compuesto orgánicos volátiles distintos de metano, 34 toneladas de óxidos de azufre, 3,4 toneladas de amoníaco, 807 toneladas de material particulado, 469.500 toneladas de dióxido de carbono, 4 toneladas de metano y 22 toneladas de óxido nitroso N₂O.

En modo maniobra el transporte naviero en los puertos de Quintero generó durante el 2023: 191 toneladas de óxidos nitrosos NO_x, 27 toneladas de monóxido de carbono, 7,7 toneladas de compuesto orgánicos volátiles distintos de metano, 0,84 toneladas de óxidos de azufre, 0,09 toneladas de amoníaco, 26 toneladas de material particulado, 11.720 toneladas de dióxido de carbono, 0,15 toneladas de metano y 0,5 toneladas de óxido nitroso N₂O.

En modo puerto el transporte naviero en los puertos de Quintero generó durante el 2023: 910 toneladas de óxidos nitrosos NO_x, 58 toneladas de monóxido de carbono, 13 toneladas de compuesto orgánicos volátiles distintos de metano, 3,3 toneladas de óxidos de azufre, 0,39 toneladas de

amoniaco, 32 toneladas de material particulado, 46.970 toneladas de dióxido de carbono, 0,26 toneladas de metano y 2 toneladas de óxido nitroso N₂O.

Al comparar las distintas medidas de mitigación recopiladas de la literatura académica se encontró en el panorama general de que muchas de estas medidas tienen un considerable potencial de mitigación, sin embargo presentan problemas a la hora de ser evaluadas en un panorama teórico o aplicadas en la práctica, esto se debe a que los estudios o investigaciones que se tiene de estas herramientas son muy acotados o no cuenta con los antecedentes y datos suficientes para ser evaluados teóricamente. De la misma manera, estas herramientas también suelen estar restringidas a su poca viabilidad respecto a su implementación o aplicación, esto debido que por temas económicos, políticos o técnicos pueden ser muy complejas o de plano inconvenientes. Si bien el alcance de esta investigación no realiza un análisis extenso en términos económicos, políticos o técnicos, se consideró en base a la información que se posee la factibilidad en estos aspectos.

Consideran el alcance que se propone para esta investigación, se considera la implementación del uso de gas licuado (LNG) con un sistema híbrido eléctrico, la instalación del sistema On Shore Power (OPS) y la instalación del sistema de amarrado automático (AMS) como un plan de mitigación de emisiones transitorio competente para alcanzar un nivel menor de gases contaminantes en comparación al nivel de gases contaminantes actual estimado. Al estimar el porcentaje de reducción de estas medidas aplicadas a los tres modos de operación se obtuvo: 78,14% de óxidos nitrosos NO_x, 28,28% de monóxido de carbono, 27,06% de compuesto orgánicos volátiles distintos de metano, 97,69% de óxidos de azufre, 27,56% de amoniaco, 88,06% de material particulado, 25,67% de dióxido de carbono, 27,02% toneladas de metano y 27,08% toneladas de óxido nitroso N₂O.

Al aplicar las medidas de mitigación propuestas se obtuvo que el transporte naviero en los puertos de Quintero, en referencia al año 2023, podría disminuir sus emisiones a estos niveles: 2828 toneladas de óxidos nitrosos NO_x, 404 toneladas de monóxido de carbono, 158 toneladas de compuesto orgánicos volátiles distintos de metano, 0,88 toneladas de óxidos de azufre, 2,8 toneladas de amoniaco, 103 toneladas de material particulado, 392.600 toneladas de dióxido de carbono, 3,2 toneladas de metano y 18 toneladas de óxido nitroso N₂O.

5.3 Recomendaciones

Las medidas de mitigaciones aplicadas en esta estimación reflejan un alto potencial en cuanto a mejorar las condiciones ambientales en los puertos de Quintero, si bien el alcance de esta investigación se limita a solamente aplicar estos factores de reducción de manera teórica, las estimaciones realizadas muestran por medio de una metodología y estudios confiables de que estas medidas pueden mejorar el actual problema de contaminación en los puertos, estos resultados muestran de que el uso de estas herramientas pueden mejorar la calidad de vida de las personas, mejorar las condiciones ambientales y favorecer al medio ambiente.

El análisis mostrado solo es una fracción del potencial de mitigación que se puede alcanzar con estas medidas, si se profundiza la investigación y se promueve colaboración entre las partes involucradas se puede expandir el espectro de medidas aplicables para la reducción, mitigando aún más gases contaminantes o reduciendo las emisiones de gases por completo. Para que esto fuera posible se requiere de antecedentes y detalles más profundos de estas medidas en el aspecto técnico, sumada con investigaciones con experimentos en práctica que determinen cuanto de las emisiones es reducido y en qué circunstancias.

Durante el cálculo de la estimación la principal limitante para aplicar las medidas de mitigación es que no hay bases experimentales o teóricas para aplicar un factor de reducción a las emisiones calculadas, eso por lo menos para el alcance bibliográfico de esta investigación. Se recomienda realizar un estudio más extenso de este tópico, con una base bibliográfica más amplia, con más colaboradores y con experimentación podrían obtenerse más información de estas medidas de mitigación y su comportamiento, de manera de definir cuáles son las medidas óptimas y como deberían aplicarse, además de promover el desarrollo de tecnologías emergentes y más prometedoras como el hidrogeno verde o el amoniaco con hidrogeno, tecnologías que al superar sus barreras técnicas y económicas podrían ser una solución definitiva para la contaminación atmosférica de los puertos de mucho lugares del mundo, sin embargo esto puede ser alcanzado por medio de años de investigación y colaboración.

Se recomienda la implementación del uso de LNG con un sistema hibrido eléctrico, la instalación del sistema OPS y la instalación del sistema de amarrado automático (AMS) como un plan de mitigación de emisiones transitorio competente para alcanzar un nivel menor de gases contaminantes en comparación al nivel de gases contaminantes actual estimado.

Se recomienda de igual manera realizar el análisis de esta investigación considerando más metodologías y usando datos más actuales, ya que por ejemplo los datos proporcionados por ENTEC UK son del año 2010. Esto se considera ya que la firma AMBIOSIS hizo una estimación con un método más robusto que el presentado en esta investigación, si bien los resultados fueron similares, si eran diferentes en algunas cantidades. Si se actualizan ciertos datos y se prueba con otra metodología de cálculo de emisiones, probablemente se puedan obtener resultados mucho más parecidos a los estimados por la firma AMBIOSIS.

Bibliografía

Acciaro, M., Ghiara, H., & Cusano, M. I. (2014). Energy management in seaports: A new role for port authorities. *Energy Policy*, 71, 4-12.

Adaptado de “Emisiones del Transporte”, Agencia Europea del Medio Ambiente, 2022, www.europarl.europa.eu.

Alamouh, A. S., Ölçer, A. I., & Ballini, F. (2022). Ports’ role in shipping decarbonisation: A common port incentive scheme for shipping greenhouse gas emissions reduction. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 3, 100021.

Bailey, D., & Solomon, G. (2004). Pollution prevention at ports: clearing the air. *Environmental impact assessment review*, 24(7-8), 749-774.

Bhowmik, R., Rahut, D. B., & Syed, Q. R. (2022). Investigating the impact of climate change mitigation technology on the transport sector CO2 Emissions: Evidence from panel quantile regression. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 916356.

Bjerkan, K. Y., & Seter, H. (2019). Reviewing tools and technologies for sustainable ports: Does research enable decision making in ports?. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 72, 243-260.

Buonomano, A., Del Papa, G., Giuzio, G. F., Palombo, A., & Russo, G. (2023). Future pathways for decarbonization and energy efficiency of ports: Modelling and optimization as sustainable energy hubs. *Journal of Cleaner Production*, 420, 138389.

Claudio Flores., (2023). Estimación de los Niveles de Actividad y Emisiones Producidas por el Transporte Marítimo y Aéreo en Chile al 2050. *Energy*.

Díaz-Ruiz-Navamuel, E., Piris, A. O., & Pérez-Labajos, C. A. (2018). Reduction in CO2 emissions in RoRo/Pax ports equipped with automatic mooring systems. *Environmental Pollution*, 241, 879-886.

Hadadpour, S., Etemad-Shahidi, A., Jabbari, E., & Kamranzad, B. (2014). Wave energy and hot spots in Anzali port. *Energy*, 74, 529-536.

Issa, M., Ilinca, A., & Martini, F. (2022). Ship energy efficiency and maritime sector initiatives to reduce carbon emissions. *Energies*, 15(21), 7910.

Jimenez, V. J., Kim, H., & Munim, Z. H. (2022). A review of ship energy efficiency research and directions towards emission reduction in the maritime industry. *Journal of Cleaner Production*, 366, 132888.

Karaçay, Ö. E., & Özsoysal, O. A. (2021). Techno-economic investigation of alternative propulsion systems for tugboats. *Energy Conversion and Management: X*, 12, 100140.

Kim, A. R., Seo, J., & Seo, Y. J. (2023). Key barriers to adopting onshore power supply to reduce port air pollution: Policy implications for the maritime industry in South Korea. *Marine Policy*, 157, 105866.

Law, L. C., Mastorakos, E., & Evans, S. (2022). Estimates of the decarbonization potential of alternative fuels for shipping as a function of vessel type, cargo, and voyage. *Energies*, 15 (20), 7468.

López, J. M. L., Karimpour, R., Molina, R. G., & Picco, A. (2023). Ealing project-Exploratory analysis of the future implementation of Onshore Power Supply facilities in European ports and relevant technical aspects for Port Authorities. *Transportation Research Procedia*, 72, 4135-4142.

Martínez-López, A., Romero, A., & Orosa, J. A. (2021). Assessment of cold ironing and LNG as mitigation tools of short sea shipping emissions in port: a Spanish case study. *Applied Sciences*, 11(5), 2050.

Misra, A., Panchabikesan, K., Gowrishankar, S. K., Ayyasamy, E., & Ramalingam, V. (2017). GHG emission accounting and mitigation strategies to reduce the carbon footprint in conventional port activities—a case of the Port of Chennai. *Carbon management*, 8(1), 45-56.

Naty, S., Viviano, A., & Foti, E. (2016). Wave energy exploitation system integrated in the coastal structure of a Mediterranean port. *Sustainability*, 8(12), 1342.

Osses, J. R. P., Palma, V. M., Reusser, C. A., & Contreras, J. (2022). Emissions assessment of a tanker in a chilean port using bi-directional cold ironing integrated to LNG. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102135.

Piris, A. O., Díaz-Ruiz-Navamuel, E., Pérez-Labajos, C. A., & Chaveli, J. O. (2018). Reduction of CO₂ emissions with automatic mooring systems. The case of the port of Santander. *Atmospheric Pollution Research*, 9(1), 76-83.

Ramos, V., Carballo, R., Álvarez, M., Sánchez, M., & Iglesias, G. (2014). A port towards energy self-sufficiency using tidal stream power. *Energy*, 71, 432-444.

Spengler, T., & Tovar, B. (2021). Potential of cold-ironing for the reduction of externalities from in-port shipping emissions: The state-owned Spanish port system case. *Journal of Environmental Management*, 279, 111807.

Styhre, L., Winnes, H., Black, J., Lee, J., & Le-Griffin, H. (2017). Greenhouse gas emissions from ships in ports—Case studies in four continents. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 212-224.

Torreglosa, J. P., González-Rivera, E., García-Triviño, P., & Vera, D. (2022). Performance analysis of a hybrid electric ship by real-time verification. *Energies*, 15(6), 2116.

Tuswan, T., Misbahudin, S., Junianto, S., Yudo, H., Santosa, A. W. B., Trimulyono, A., ... & Chrismianto, D. (2022, September). Current research outlook on solar-assisted new energy ships: representative applications and fuel & GHG emission benefits. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1081, No. 1, p. 012011). IOP Publishing.

Wang, J. Z., Feng, G. F., Yin, H. T., & Chang, C. P. (2023). Toward sustainable development: Does the rising oil price stimulate innovation in climate change mitigation technologies?. *Economic Analysis and Policy*, 79, 569-583.

Winnes, H., Styhre, L., & Fridell, E. (2015). Reducing GHG emissions from ships in port areas. *Research in Transportation Business & Management*, 17, 73-82.

Wu, Y., Chen, A., Xiao, H., Jano-Ito, M., Alnaeli, M., Alnajideen, M., ... & Valera-Medina, A. (2023). Emission reduction and cost-benefit analysis of the use of ammonia and green hydrogen as fuel for marine applications. *Green Energy and Resources*, 1(4), 100046.

Zhang, Z., Song, C., Zhang, J., Chen, Z., Liu, M., Aziz, F., ... & Yap, P. S. (2023). Digitalization and innovation in green ports: A review of current issues, contributions and the way forward in promoting sustainable ports and maritime logistics. *Science of the Total Environment*, 169075.