



Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería en Medioambiente
Ingeniería Ambiental

**Evaluación de la reducción de emisiones de gases de combustión
procedentes de embarcaciones marítimas utilizando el criterio MARPOL.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO
AMBIENTAL**

AUTOR: Catalina Andrea González Contreras

PROFESOR GUÍA: Ma Lorena Álvarez Sánchez

VALPARAÍSO, 2024

Agradecimientos

Este trabajo de título es únicamente fruto del esfuerzo de mis padres, quienes me han dado todo en la vida y más. Les agradezco a ellos por darme la mejor familia que podría haber tenido, por enseñarme día a día valores como el esfuerzo, la responsabilidad y la resiliencia. Les agradezco por haberme enseñado lo que es el amor verdadero y la fortaleza del alma, por nunca rendirse ante las adversidades y por siempre darme consuelo ante momentos oscuros.

Le agradezco a mis hermanos que siempre me han cuidado y enseñado todo cuanto estaba a su alcance. Me han abierto un camino más amigable hacia la vida, gracias por ser excelentes hermanos mayores.

Le doy gracias infinitas a mi pareja, quien sin ninguna razón más allá del amor se mantuvo firme a mi lado en todo momento a lo largo de esta travesía, incluso cuando yo no tenía fuerzas para hacerlo. Gracias por enseñarme cosas que van más allá de lo que yo pueda comprender, por escucharme siempre, por ser mi rayo de sol y por demostrarme que sí existen los personajes de los cuentos en la vida real.

Agradezco a los amigos que hice gracias a esta carrera, porque se me hizo muy difícil encontrarlos, pero no pude haber dado con amigos mejores que ellos. Gracias por motivarme a asistir a clases y hacer trabajos cuando el ánimo flanqueaba, por hacerme reír cada día y por darme una familia mientras estuve lejos de la mía.

Gracias a mi profesora guía por ayudarme en todo el proceso de elaboración de este trabajo, al Capitán De La Fuente y personal de la Capitanía de Quintero por apoyarme en la recopilación de datos.

Quiero dar gracias especialmente a mi mamá por ser tan fuerte, bondadosa y maravillosa. Gracias por verme llegar a estas instancias, porque siempre se puede salir adelante con el amor y el apoyo necesarios, y este cáncer no será la excepción.

El fin de una etapa no es más que el inicio de otra nueva.

Resumen

El presente estudio aborda la reducción de las emisiones contaminantes generadas por embarcaciones marítimas en Chile, aplicando el criterio establecido por el Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (MARPOL), evaluando su efectividad ante la regulación de estos gases para mitigar su efecto negativo sobre el medio ambiente y la salud humana. La investigación se enfoca en los principales contaminantes generados por motores diésel marinos, como los óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), los cuales contribuyen al cambio climático, la acidificación de los océanos, la contaminación del aire en áreas portuarias y costeras y otros efectos tanto en el medio ambiente como en la salud humana. Dada la dependencia de Chile en el transporte marítimo, que representa un pilar clave de su economía, el estudio analiza cómo el Convenio MARPOL contribuye a la reducción de estos gases mediante límites en el contenido de azufre en combustibles y otras normativas ambientales.

La metodología empleada incluyó una revisión exhaustiva de normativas nacionales e internacionales sobre emisiones marítimas y un análisis de caso utilizando un buque de clase portacontenedores denominado Cóndor en estado de operación en Chile, que presenta una actividad de 237 días de actividad y 54903,9 millas náuticas recorridas en el año 2022. Mediante estimaciones de emisiones realizadas a partir de datos de consumo de combustible y características operativas del motor, se evaluó la reducción de SO_x en escenarios con y sin la aplicación del criterio MARPOL. Los resultados revelan que la limitación de contenido de azufre en combustibles a un 0,5% permite reducir las emisiones de SO_2 de 793,4 [mg/Nm^3] a 113,3 [mg/Nm^3], equivalente a una reducción anual de 368,9 toneladas a 52,7 toneladas. Sin embargo, el convenio no regula específicamente las emisiones de NO_x , que alcanzaron un valor estimado de 1974,9 [mg/Nm^3], correspondiente a 918,3 toneladas anuales, ni de PM, cuya emisión se estimó en 57,6 [mg/Nm^3] o 26,7 toneladas anuales.

El análisis de la normativa vigente evidenció que varios países aplican normativas más estrictas para las emisiones de NO_x y PM que las establecidas en MARPOL, incluyendo Estados Unidos, con sus niveles de control de emisiones (Tier III y IV) para motores diésel marinos, límites de emisión que el buque Cóndor no cumple. En este contexto, se identificaron alternativas técnicas que podrían complementar al convenio MARPOL, tales como el uso de tecnologías de reducción catalítica selectiva, la inyección de gases de escape recirculados (EGR), la migración a combustibles como el GNL o el hidrógeno verde e incluso la utilización de plasma no térmico para la reducción de emisiones, alternativas complementarias a los sistemas de lavado de gases (scrubbers) ya utilizados en la industria.

Este estudio subraya la necesidad de implementar regulaciones adicionales y nuevas tecnologías para abordar las limitaciones de MARPOL en la reducción de emisiones contaminantes. La adopción de estas medidas en Chile contribuiría a un transporte marítimo más sostenible, preservando la salud de las comunidades costeras y protegiendo los ecosistemas marinos.

Índice

1.	Introducción	7
2.	Estado del arte	10
2.1	Motores.....	11
2.2	Combustibles.....	13
2.3	Combustión	14
2.4	Actividad marítima en Chile	17
2.5	Convenio MARPOL	19
3.	Problema.....	25
4.	Objetivos	26
4.1	Objetivo general:.....	26
4.2	Objetivos específicos:.....	26
5.	Revisión bibliográfica	27
6.	Metodología.....	28
6.1	Analizar normativas internacionales que regulan las emisiones de gases de combustión provenientes de la actividad marítima.	28
6.2	Analizar la concentración de las emisiones de un caso de estudio para evaluar la efectividad del criterio MARPOL en la reducción de dichas emisiones.	28
6.3	Proponer alternativas técnicas para complementar lo establecido por el Convenio MARPOL, de forma de asegurar la emisión de gases más limpios.....	29
7.	Resultados.....	31
7.1	Analizar normativas internacionales que regulan las emisiones de gases de combustión provenientes de la actividad marítima.	31
7.2	Analizar la concentración de las emisiones de un caso de estudio para evaluar la efectividad del criterio MARPOL en la reducción de dichas emisiones.	36

7.3	Proponer alternativas técnicas para complementar lo establecido por el Convenio MARPOL, de forma de asegurar la emisión de gases más limpios.....	43
8.	Discusión	47
9.	Conclusión.....	50
10.	Bibliografía	53
11.	Anexos.....	55
11.1	Respuesta a solicitud OIRS	55
11.2	Tabla caso de estudio.....	55
11.3	Volumen de aire consumido	56
11.4	Combustible consumido.....	57
11.5	Azufre consumido y SO2 generado	58
11.6	Cálculo emisión de NOx.....	60
11.7	Cálculo de emisión de material particulado.....	61

Índice de figuras

Figura 2.1: Motor cuatro tiempos (Pérex, A. et al. 2013).	12
Figura 2.2: Motor dos tiempos. (Baraona, G. Velasteguí, L. 2019).	13
Figura 2.3: Naves registradas entre 2013 y 2022 (Armada de Chile, 2023).....	18
Figura 2.4: Naves nacionales y extranjeras recaladas en puertos nacionales año 2022 (Armada de Chile, 2023).	19
Figura 2.5: Cómo elimina los gases un Scrubber (Tecam, 2024).....	21
Figura 2.6: Emisión total de contaminantes atmosféricos del E-PRTR en un radio de 2 km de los puertos (European Environment Agency, 2021).....	22
Figura 2.7: Concentración promedio anual de SO ₂ en EMRP "Centro Quintero". (Sistema de Información de Calidad del Aire, 2024).....	23
Figura 2.8: Concentración promedio anual de NO _x en EMRP "Centro Quintero". (Sistema de Información de Calidad del Aire, 2024).....	24
Figura 7.1: Contenido documento DIRECTEMAR (Elaboración propia).	36
Figura 7.2: Información del manual de motor (MAN diesel & turbo).....	39
Figura 7.3: Propiedades del petróleo IFO 380 de ENAP (Empresa Nacional del Petróleo, 2024).....	40
Figura 7.5: Distribución del sistema de reducción catalítica. (Ilpea, 2024).	44
Figura 7.6: Distribución del sistema EGR (García, P. 2024).....	45
Figura 7.7: Reactor DBD. (United States Environmental Protection Agency, 2005).....	46

Índice de tablas

Tabla 1.1: Tasa anual de emisiones embarcaciones 2020 (Armada de Chile, 2020)	8
Tabla 6.1: Formato de identificación de normativas.	28
Tabla 6.2: Formato de identificación de alternativas.	30
Tabla 7.1: Normativa recopilada.	31
Tabla 7.2: Valores límite para Tier nivel I.	34
Tabla 7.3: Valores límite para Tier nivel II.	34
Tabla 7.4: Valores límite para Tier nivel III.	34
Tabla 7.5: Categorías de buques de acuerdo con su función o mercancía.	36
Tabla 7.6: Clases de buques que pasaron el filtro.	37
Tabla 7.7: Factores de emisión en procesos de combustión interna de motores estacionarios. (United States Environmental Protection Agency, 1996).	41
Tabla 7.8: Resumen de las estimaciones por cada contaminante.	42
Tabla 7.9: Técnicas de mitigación conocidas.	43

Índice de ecuaciones

Ecuación 2.1	15
Ecuación 2.2	16
Ecuación 2.3	16
Ecuación 2.4	16
Ecuación 2.5	16
Ecuación 2.6	16
Ecuación 2.7	17
Ecuación 7.1	40

1. Introducción

En el escenario económico global, la exportación e importación de mercancías de todo tipo, tamaño y cantidad son fundamentales para el abastecimiento y el desarrollo de las naciones. El transporte de estos bienes puede realizarse por tres principales rutas: terrestre, aérea y marítima. La elección de una u otra depende de factores clave como la distancia entre el origen y el destino, el tiempo de entrega requerido, el tipo de mercancía y su volumen. Como bien destaca García Sabater en su obra *Introducción al transporte de mercancías (2020)*, "sin transporte no hay comercio y sin comercio no hay actividad económica sostenible". Esta afirmación resalta la función crucial que desempeña el transporte en la economía mundial y su papel en la interconexión de los mercados.

El incremento en la demanda global de productos ha vuelto imperativo utilizar medios de transporte que puedan movilizar grandes volúmenes de manera eficiente, segura y económica. En este contexto, el transporte aéreo, aunque rápido, es el más caro y ambientalmente perjudicial, generando en promedio 602 gramos de CO₂ por cada tonelada transportada a lo largo de un kilómetro, el transporte terrestre, por su parte, es más asequible, pero su capacidad de carga es limitada y emite en promedio 62 gramos de CO₂ por tonelada por kilómetro recorrido, de las tres opciones, el transporte marítimo sobresale como el más económico y con el menor impacto ambiental, con una emisión de apenas 3 gramos en promedio de CO₂ por kilómetro y tonelada transportada (*Mundo Marítimo, 2020*). No es sorprendente entonces que esta vía represente el 80% del volumen del comercio mundial, según el informe de la OMI de 2022, consolidándose como la columna vertebral del comercio internacional.

Chile, ubicado en el hemisferio sur de América, es un país que, por su geografía única (un territorio largo, angosto y rodeado por barreras naturales como la Cordillera de los Andes y el Océano Pacífico) enfrenta grandes desafíos en cuanto a su conectividad global. Estas condiciones hacen que el transporte terrestre esté limitado en su alcance internacional, lo que ha llevado al país a depender en gran medida de su extensa costa para el intercambio comercial, principalmente a través de rutas marítimas. Esta situación ha hecho que el número de embarcaciones que transitan por sus aguas sea considerable, impulsando una industria marítima clave para su economía.

Las embarcaciones que operan en Chile suelen usar motores diésel marino, que, aunque eficientes, generan una considerable cantidad de gases contaminantes como resultado de la combustión. Entre estos contaminantes se encuentran los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los óxidos de azufre (SO_x), que no solo contribuyen al cambio climático, sino que también pueden desencadenar fenómenos adversos como la lluvia ácida, afectando gravemente la biodiversidad marina y terrestre. Estos gases, altamente solubles en agua, contribuyen a la acidificación de los océanos y cuerpos de agua, generando impactos ecológicos de gran magnitud. Asimismo, el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y el material particulado (PM) liberado en el proceso afectan la salud humana, causando problemas respiratorios y cardiovasculares, especialmente en grupos vulnerables como niños, ancianos y personas con enfermedades preexistentes.

La creciente preocupación por los efectos negativos de estas emisiones ha llevado a la industria marítima a enfrentar el reto de reducir su impacto ambiental. Chile, debido a su intensa actividad en el comercio marítimo, es un caso paradigmático. En 2022, se movilizaron 61.349.385 toneladas de mercancías desde el territorio chileno, de las cuales el 44,1% tenía como destino China, el 16% Estados Unidos y el 7,6% Japón (Armada de Chile, 2022). En 2023, el país registró un total de 140.484.214 toneladas métricas transportadas mediante cabotaje e intercambio internacional.

Sin embargo, esta gran actividad también ha generado preocupaciones ambientales, especialmente en zonas como Quintero y Puchuncaví, donde las emisiones de otro tipo de industrias ya han causado episodios de intoxicación masiva entre los habitantes. En 2020, la Armada de Chile realizó un inventario de emisiones en la bahía de Quintero, revelando datos alarmantes sobre los niveles de contaminantes generados por las embarcaciones atracadas en los puertos, como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Tasa anual de emisiones embarcaciones 2020 (Armada de Chile, 2020)

Parámetro	Emisión [Ton/año]
MP 10	31,04
MP 2,5	28,55
COVs	47,65
SO ₂	41,93
NO _x	815,28
CO	119,47
NH ₃	0,51

Estas emisiones no solo representan un peligro ambiental, sino también un riesgo directo para la salud de las comunidades costeras. Se estima que, a nivel global, las emisiones de los barcos son responsables de aproximadamente 60.000 muertes anuales (European Environment Agency, 2021).

Este tipo de cifras subraya la necesidad urgente de acciones contundentes, como las impulsadas en Europa, donde el 40% de la población vive a menos de 50 kilómetros de la costa, expuesta a la contaminación atmosférica proveniente de los buques, según el Informe Medioambiental sobre el Transporte Marítimo Europeo de 2021.

En respuesta a esta problemática, se han desarrollado normativas tanto a nivel nacional como internacional para reducir las emisiones contaminantes de las embarcaciones. A nivel global, el Convenio MARPOL, creado por la Organización Marítima Internacional (OMI) en 1973 y ratificado por Chile en 1994, establece regulaciones para controlar la contaminación marina. El Anexo VI, introducido en 1997, establece límites estrictos para las emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno, fijando como fecha límite el año 2020 para que los buques redujeran sus emisiones de SO_x a un

máximo del 0,5%. Con 166 países adheridos al convenio, existe un compromiso global para proteger el medio ambiente marino.

Para cumplir con estas normativas, las embarcaciones han comenzado a implementar tecnologías más limpias, como la sustitución del diésel marino por ULSFO (combustible bajo en azufre), o la instalación de sistemas de tratamiento de gases, conocidos como *scrubbers*. Estos dispositivos reducen significativamente la emisión de SO_x, NO_x y material particulado, contribuyendo así a un transporte marítimo más sostenible. Además, la investigación continua en tecnologías de precombustión y mejora en la eficiencia energética abre nuevas posibilidades para reducir aún más la huella ambiental del sector.

El transporte marítimo es, sin duda, un pilar fundamental del comercio internacional. Sin embargo, para garantizar su sostenibilidad a largo plazo, es necesario seguir promoviendo prácticas y tecnologías que reduzcan su impacto ambiental, protegiendo tanto el medio marino como la salud de las poblaciones que dependen de él.

2. Estado del arte

La evolución de la navegación ha sido un pilar fundamental en el desarrollo del comercio marítimo y, en general, de la economía mundial. Desde tiempos antiguos, los avances tecnológicos en este ámbito han marcado la pauta para mejorar la velocidad, eficiencia y capacidad de las embarcaciones, consolidando el transporte marítimo como una de las principales formas de comercio. Las primeras embarcaciones documentadas eran rudimentarias y se movían gracias al esfuerzo físico de sus ocupantes, quienes, en un principio, utilizaban sus brazos para impulsarlas en aguas tranquilas. Con el tiempo, se incorporaron remos, lo que permitió mayor control y capacidad de navegación, perfeccionándose hasta ser aptas para aventurarse en aguas más profundas y peligrosas como los mares abiertos.

El siguiente gran avance en la historia de la navegación fue la aparición de los barcos a vela. Estos revolucionaron el transporte marítimo al aprovechar el viento como fuerza impulsora, permitiendo a las embarcaciones recorrer grandes distancias de forma más eficiente y menos dependiente del esfuerzo humano. Este desarrollo facilitó la expansión del comercio entre continentes y fomentó la creación de rutas comerciales que transformarían la economía global.

En el siglo XIX, las embarcaciones a vapor marcaron un hito tecnológico decisivo. Equipadas con motores de vapor, estas naves funcionaban mediante un sistema que calentaba agua hasta convertirla en vapor, lo que activaba un mecanismo para generar movimiento. Este avance no solo incrementó la velocidad y autonomía de los barcos, sino que también los hizo menos dependientes de las condiciones meteorológicas, lo que significaba un transporte más fiable y eficiente. Los barcos a vapor jugaron un papel crucial en la industrialización y la expansión de las rutas comerciales durante esta época.

Con la llegada del siglo XX, la industria marítima volvió a innovar, introduciendo motores de combustión interna, principalmente impulsados por derivados del petróleo, como el diésel. Estos motores, más potentes y eficientes que los de vapor, permitieron un mayor avance en la capacidad de carga y velocidad de las embarcaciones, lo que contribuyó al auge del comercio marítimo internacional. Gracias a esta tecnología, el transporte marítimo se consolidó como una opción esencial y altamente competitiva para el movimiento de mercancías a nivel global.

La especialización de las embarcaciones también fue un resultado de estos avances tecnológicos. A medida que crecía la demanda de productos y el comercio global se expandía, surgieron distintos tipos de buques diseñados específicamente según el tipo de carga que transportaban. Por ejemplo, los buques graneleros, diseñados para transportar productos sólidos y líquidos a granel, o los petroleros, especializados en el transporte de petróleo y otros combustibles. Sin embargo, los portacontenedores han llegado a ser los más grandes y predominantes en la actualidad, facilitando el movimiento masivo de contenedores que permiten el transporte de una amplia gama de productos de manera eficiente.

Estos desarrollos tecnológicos no solo han transformado el transporte marítimo en una industria moderna y altamente especializada, sino que también han sido clave en la interconexión global de los mercados, contribuyendo de manera significativa al crecimiento del comercio y la economía mundial.

2.1 Motores

Los motores de combustión interna tienen como propósito fundamental convertir la energía química del combustible en trabajo mecánico. Según Rafael M. (2014), esta energía se libera a través de la reacción de combustión que ocurre dentro del motor, en la cual una mezcla de combustible y aire (comburente) se quema para producir movimiento.

Existen diferentes tipos de motores de combustión interna, pero la clasificación más común se basa en los ciclos de funcionamiento: motores de dos tiempos y motores de cuatro tiempos. Cada uno tiene características específicas que los hacen más adecuados para diferentes aplicaciones.

Los motores de cuatro tiempos son los más utilizados en los automóviles convencionales y están compuestos por uno o más cilindros, dentro de los cuales se encuentran varios componentes clave: la válvula de admisión, la cámara de combustión, el pistón, la biela, el cigüeñal, un contrapeso, y la válvula de escape.

Se les denomina de cuatro tiempos porque su ciclo de funcionamiento se divide en cuatro etapas:

1. **Admisión:** El ciclo comienza cuando el pistón desciende hacia el punto muerto inferior, creando un vacío parcial dentro del cilindro. Esto permite que la mezcla de aire y combustible entre a través de la válvula de admisión y llene la cámara de combustión.
2. **Compresión:** A medida que el pistón asciende nuevamente hacia el punto muerto superior, la mezcla de aire y combustible se comprime, aumentando la presión dentro de la cámara de combustión.
3. **Expansión:** En el momento en que la mezcla comprimida se inflama (generalmente a través de una chispa), se produce una explosión controlada. Esta fuerza impulsa el pistón hacia abajo nuevamente, generando el movimiento que activa el cigüeñal y produce el trabajo mecánico.
4. **Escape:** Finalmente, el pistón vuelve a subir, empujando los gases de combustión fuera del cilindro a través de la válvula de escape, completando el ciclo.

Este ciclo se puede ver ilustrado en la figura 2.1. Este proceso se repite de manera continua, transformando la energía química en movimiento que, en el caso de los automóviles, se traduce en el desplazamiento del vehículo.

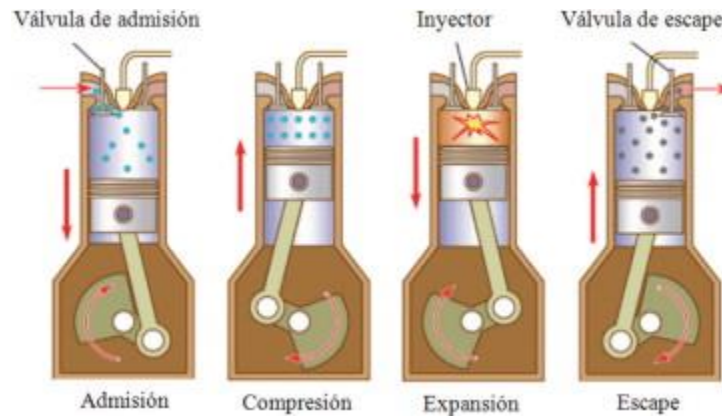


Figura 2.1: Motor cuatro tiempos (Pérex, A. et al. 2013).

Los motores de dos tiempos funcionan de manera distinta a los motores de cuatro tiempos principalmente por dos razones: el ciclo de trabajo se completa en solo dos etapas, y la ubicación de las válvulas es diferente. En los motores de dos tiempos, la válvula de admisión está situada en la parte baja del cilindro, lo que influye en el proceso de admisión y escape.

En el primer tiempo, se combinan las etapas de compresión y admisión. Cuando el pistón alcanza el punto muerto superior, se abre la válvula de admisión y permite que la mezcla de aire-combustible ingrese en la cámara de combustión. A medida que el pistón asciende, comprime esta mezcla en la cámara, lo que provoca su ignición. Esta explosión da inicio al siguiente tiempo.

El segundo tiempo incluye las fases de expansión y escape. La fuerza generada por la combustión impulsa el pistón hacia el punto muerto inferior. A medida que el pistón desciende, la mezcla recién ingresada de aire-combustible empuja los gases resultantes de la combustión hacia la válvula de escape, que se abre para liberar los gases al exterior (H. Crouse, W. 1970), este proceso se puede visualizar de manera más efectiva en la figura 2.2.

Este ciclo es más simple y rápido que el de los motores de cuatro tiempos, lo que permite que los motores de dos tiempos produzcan más potencia por cada ciclo, aunque tienden a ser menos eficientes y más contaminantes.

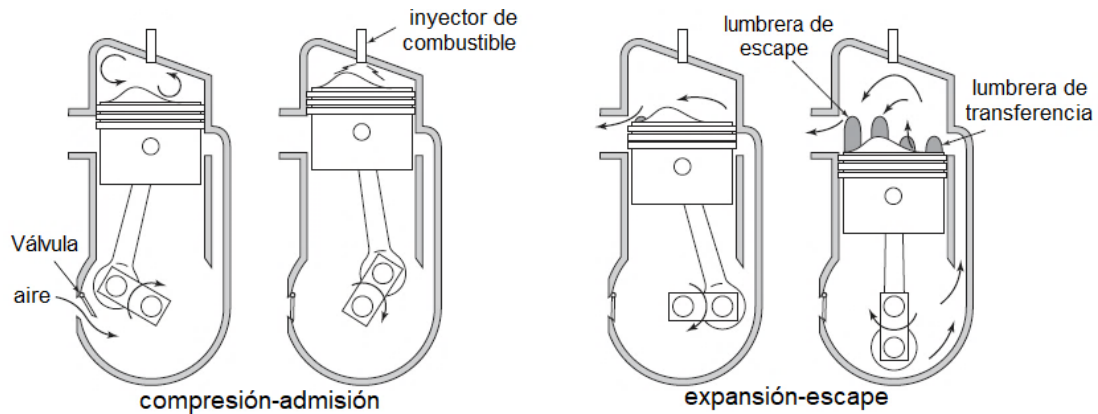


Figura 2.2: Motor dos tiempos. (Baraona, G. Velasteguí, L. 2019).

Ambos tipos de motores permiten diversas configuraciones en la disposición de los cilindros y la cantidad de pistones, lo que puede influir en el rendimiento del motor. Entre las configuraciones más comunes se encuentran los motores en V, en W, Bóxer o de pistón doble. Estas variaciones afectan tanto la eficiencia como la potencia del motor, adaptándose a diferentes necesidades de diseño y aplicaciones.

En la industria marítima, los motores de dos tiempos son predominantes como motores principales en los buques, ya que su diseño permite generar una gran cantidad de energía con mayor eficiencia para mover grandes cargas. Los motores de cuatro tiempos suelen utilizarse como motores auxiliares, encargados de funciones secundarias, pero igualmente importantes, dentro de las embarcaciones.

La combustión de combustibles dentro de estos motores produce no solo energía, sino también una serie de compuestos residuales. Entre los subproductos más comunes de la combustión están el nitrógeno, dióxido de carbono (CO_2), oxígeno, vapor de agua, óxidos de nitrógeno (NO_x) y, en menores cantidades, dióxido de azufre (SO_2) y diversos compuestos orgánicos (Ministerio de Trabajo y Economía Social, 2023). Estos compuestos, especialmente los óxidos de nitrógeno y el dióxido de azufre, son contaminantes que contribuyen al cambio climático y a la contaminación del aire, razón por la cual se han implementado diversas normativas internacionales para regular sus emisiones.

2.2 Combustibles

El tipo de combustible empleado en un motor depende directamente de sus características y uso. En el caso de los motores principales de propulsión de barcos, se suelen utilizar los residuos del proceso de destilación del petróleo, conocidos como HFO (High Fuel Oil) o HSFO (High Sulphur Fuel Oil). Estos combustibles están especificados en el convenio internacional MARPOL de 1973, que los define como aquellos con una densidad superior a 900 kg/m^3 a 15°C o con una viscosidad cinemática igual o superior a $180 \text{ mm}^2/\text{s}$. Para cumplir con ciertas normativas, los HFO a menudo se mezclan

con fracciones más ligeras derivadas de la destilación del crudo, como el gasoil o dieseloil marino, obteniéndose un producto intermedio denominado IFO (Intermediate Fuel Oil). Los IFO se clasifican según su viscosidad: IFO 180 con una viscosidad de 180 mm²/s y IFO 380 con 380 mm²/s.

El HSFO, debido a su elevada viscosidad, debe mantenerse a una temperatura mínima de 40°C para poder ser bombeado, ya que a temperaturas inferiores adquiere una consistencia demasiado densa, similar al asfalto (Observatorio de los Servicios Portuarios, 2020).

En cuanto a los motores de cuatro tiempos, ya sean de media o alta velocidad o motores auxiliares, es más común el uso de MGO (Marine Gas Oil). Este combustible es una mezcla de varios destilados obtenidos mediante destilación fraccionada y posteriormente condensados de fase gaseosa a fase líquida. Existen versiones del MGO con un contenido de azufre del 0,1%, lo que lo convierte en una opción ideal para reducir las emisiones de óxidos de azufre. Sin embargo, este combustible es también el más costoso debido a sus propiedades menos contaminantes.

Otra alternativa emergente es el VLSFO (Very Low Sulphur Fuel Oil), una mezcla que combina MGO con pequeñas cantidades de HSFO, logrando un contenido de azufre del 0,5%. Este combustible también puede producirse mediante procesos de refinación avanzada del petróleo. El VLSFO se presenta como una opción prometedora para la industria marítima, ya que ofrece una reducción significativa de emisiones a un coste menor que el MGO.

Por lo anterior, el tipo y cantidad de emisiones generadas en los gases de escape de los motores dependen estrechamente del tipo de combustible utilizado. Incluso la procedencia del crudo, es decir, el lugar de extracción puede influir en la calidad del combustible y, por ende, en las emisiones que se producen.

En Chile existe una regulación específica para los combustibles marinos que corresponde al Decreto Supremo N°103 del año 2019 del Ministerio de Energía, donde se fijan las especificaciones y requisitos que deben cumplir estos productos, entre ellos se establece un contenido máximo de azufre de 0,5% en masa de este compuesto. La Empresa Nacional del Petróleo ofrece dentro de sus productos a la venta dos categorías de combustibles aptas para el uso en el ámbito marítimo de acuerdo con el decreto N°103, los cuales son el IFO 380 y el Diesel marino DMA, ambos limitan su contenido de azufre a un 0,5% m/m para cumplir con el decreto y a su vez con lo establecido en el convenio MARPOL.

2.3 Combustión

La reacción de combustión que se lleve a cabo en la cámara de combustión del motor variará de acuerdo con el tipo de combustible utilizado. Por ejemplo, el MGO que es una fracción liviana del destilado de petróleo contiene una menor cantidad de carbonos en su estructura molecular que los IFO. Mientras más pesado sea el combustible, como en el caso de los residuos de destilación (HFO),

su cadena de carbonos será mucho más larga y presentará radicales aromáticos. A pesar de estas diferencias, la ecuación de la reacción de combustión será siempre la misma para cada carburante, y sólo variará debido a la cantidad de comburente u oxígeno con que se lleve a cabo la reacción. Existe, por lo tanto, una reacción estequiométrica que sigue la siguiente forma:

La reacción de combustión que ocurre en la cámara del motor varía según el tipo de combustible empleado. Por ejemplo, el MGO (Marine Gas Oil), que es una fracción liviana del destilado de petróleo, contiene una menor cantidad de átomos de carbono en su estructura molecular en comparación con combustibles más pesados como los IFO (Intermediate Fuel Oil) o HFO (High Fuel Oil). Estos últimos, al ser productos residuales de la destilación del crudo, presentan cadenas de carbono mucho más largas y contienen radicales aromáticos, lo que los convierte en combustibles más complejos y con mayor contenido de impurezas.

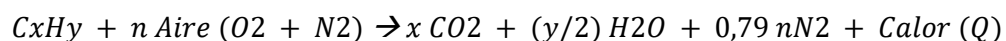
A pesar de estas diferencias estructurales, la ecuación de la reacción de combustión sigue una forma general para todos los carburantes, basada en la reacción entre el combustible y el comburente (oxígeno). La principal variación entre un combustible y otro radica en la cantidad de oxígeno necesario para que la reacción sea completa y eficiente. Esta proporción entre el combustible y el oxígeno es lo que define la reacción estequiométrica, que es la relación ideal entre ambos reactivos para asegurar que todo el combustible se queme sin generar subproductos no deseados.

La cantidad de estos subproductos generados como óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y material particulado, depende no solo del tipo de combustible utilizado, sino también de la calidad de la combustión. Si la combustión es incompleta, pueden producirse compuestos como monóxido de carbono (CO) o hidrocarburos no quemados, lo que no solo reduce la eficiencia del motor, sino que también aumenta la emisión de contaminantes a la atmósfera.

Aunque la reacción de combustión sigue un esquema general, su resultado específico y el impacto ambiental dependen en gran medida de las características moleculares del combustible y de la cantidad de oxígeno disponible durante el proceso.

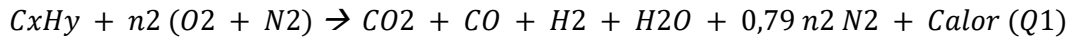
Los combustibles más pesados, como el HFO, poseen una cadena de carbono más larga, lo que se traduce en un requerimiento mayor de oxígeno y una mayor producción de residuos y emisiones, mientras que los combustibles más ligeros, como el MGO, generan una combustión más limpia y eficiente.

La ecuación 2.1 representa la reacción de combustión general.



Ecuación 2.1

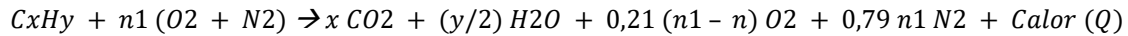
Por otro lado, la reacción de combustión con déficit de aire es la siguiente:



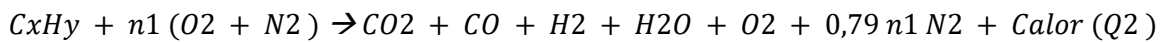
Ecuación 2.2

En este caso Q1 es menor al calor generado en una reacción completa.

Finalmente, se pueden encontrar dos reacciones en el caso de un exceso de aire alimentado, una completa como la ecuación 2.3 y otra incompleta como la ecuación 2.4, las cuales se ven a continuación respectivamente:



Ecuación 2.3

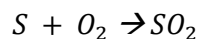


Ecuación 2.4

En esta última, el calor de Q₂ es menor al de la reacción completa.

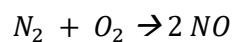
Es importante considerar, como se mencionó anteriormente, que los hidrocarburos no solo contienen moléculas de carbono e hidrógeno, sino que también presentan en menor proporción impurezas como azufre y metales pesados. Estas impurezas contribuyen a la formación de contaminantes durante la combustión. Por ejemplo, el azufre presente en el combustible se oxida, dando lugar a la formación de dióxido de azufre (SO₂) y, en menor medida, trióxido de azufre (SO₃). Este último, en contacto con agua, reacciona fácilmente para formar ácido sulfúrico (H₂SO₄), uno de los principales causantes de la lluvia ácida.

La reacción que atraviesa el azufre contenido en el combustible en presencia de oxígeno ocurre como lo indica la ecuación 2.5

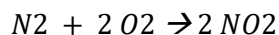


Ecuación 2.5

A su vez, las altas temperaturas en la cámara de combustión permiten que el nitrógeno presente en el aire y en el combustible reaccione con el oxígeno, generando óxidos de nitrógeno (NO_x), como el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂), estas temperaturas deben rondar los 1200 °C. La fórmula que expresa la formación del NO es la dada en la ecuación 2.6 y la formación del NO₂ se puede ver en la ecuación 2.7



Ecuación 2.6



Ecuación 2.7

Tanto los SO_x como los NO_x son gases altamente perjudiciales para el medio ambiente: contribuyen a la destrucción de la capa de ozono y son precursores de la lluvia ácida. Además, estos gases facilitan la formación de contaminantes secundarios (García, R. 2001), agravando los problemas ambientales y de salud pública.

La quema de combustibles fósiles no solo produce gases nocivos, sino también compuestos orgánicos volátiles (COVs) y material particulado (PM).

El dióxido de azufre (SO₂), uno de los principales subproductos de la combustión de combustibles fósiles, es un gas incoloro, pero altamente reactivo, que contribuye significativamente a la deposición ácida. Este fenómeno altera la calidad del suelo y del agua, afectando gravemente a los ecosistemas acuáticos como ríos y lagos, además de causar daños a bosques y vegetación (Torres, R. 2022).

Por otro lado, compuestos como el dióxido de nitrógeno (NO₂) de color amarillento y tóxico, es un gas irritante que, además de ser un precursor en la formación de partículas de nitrato, contribuye a la producción de ácidos y a elevados niveles de material particulado fino (PM 2.5). También es precursor del ozono troposférico, un contaminante clave en la formación de smog y uno de los más dañinos para la salud respiratoria y el medio ambiente (Environmental Protection Agency, 1999).

Debido a los graves impactos ambientales y sanitarios asociados a estos contaminantes, la comunidad internacional ha adoptado medidas conjuntas para reducir las emisiones de SO_x, NO_x y otros contaminantes generados por la quema de combustibles fósiles. Estas acciones buscan mitigar el calentamiento global y limitar el daño causado a los ecosistemas y la salud humana.

2.4 Actividad marítima en Chile

Varios países han tomado medidas concretas para reducir las emisiones contaminantes provenientes del transporte marítimo. Un ejemplo destacado es Alemania, que ha establecido Zonas de Control de Emisiones en el Mar Báltico y el Mar del Norte, donde se aplican estrictos límites a las emisiones de SO_x y NO_x. China, por su parte, ha implementado un programa integral de control de emisiones para reducir los gases mencionados. En América Latina, Chile también ha mostrado un creciente interés en neutralizar las emisiones generadas por la actividad marítima.

Chile cuenta con un alto nivel de actividad de la marina mercante, tanto nacional como extranjera. Esto implica que una gran flota de buques y embarcaciones debe esforzarse para cumplir con la legislación vigente en el país, incluyendo la normativa que regula las emisiones de contaminantes.

La Armada de Chile es la principal entidad responsable de supervisar y monitorear el cumplimiento de las leyes marítimas, además de mantener un registro de la actividad portuaria. En la figura 2.3, extraída del Boletín Estadístico Marítimo 2023 de la Armada, se puede observar la evolución del número de naves con bandera chilena registradas formalmente entre los años 2013 y 2022.

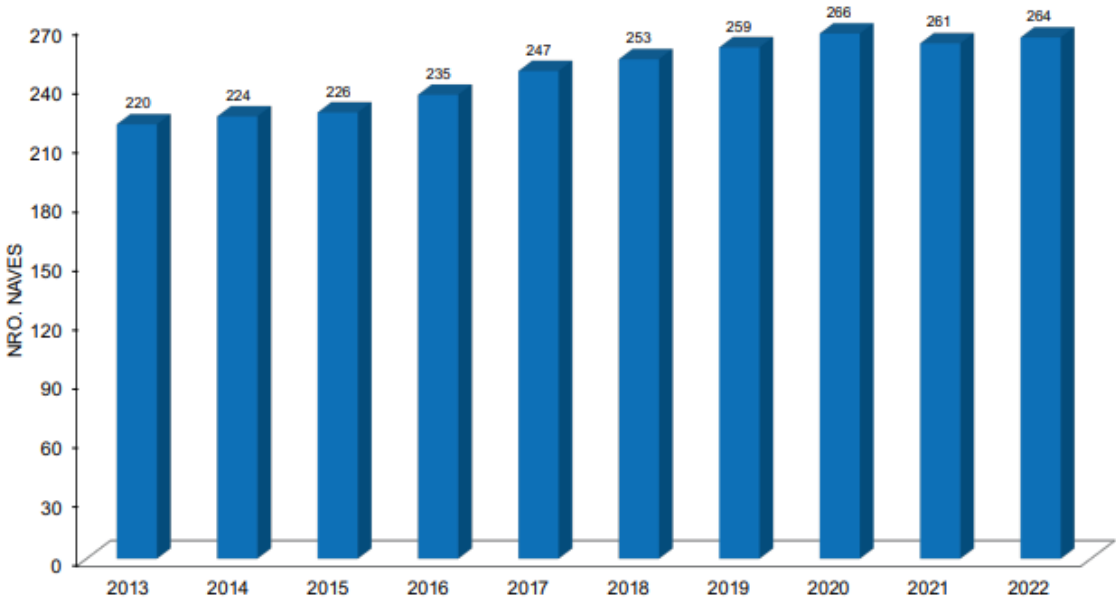


Figura 2.3: Naves registradas entre 2013 y 2022 (Armada de Chile, 2023).

Para el año 2022 la flota de embarcaciones chilena fue de 264 naves a lo largo de todo Chile. Por otro lado, en la figura 2.4 se presenta una gráfica comparativa del total de recaladas en puertos chilenos correspondientes a naves nacionales o extranjeras. Aquí se puede ver la amplia presencia de embarcaciones internacionales que llegan a puerto chilenos.

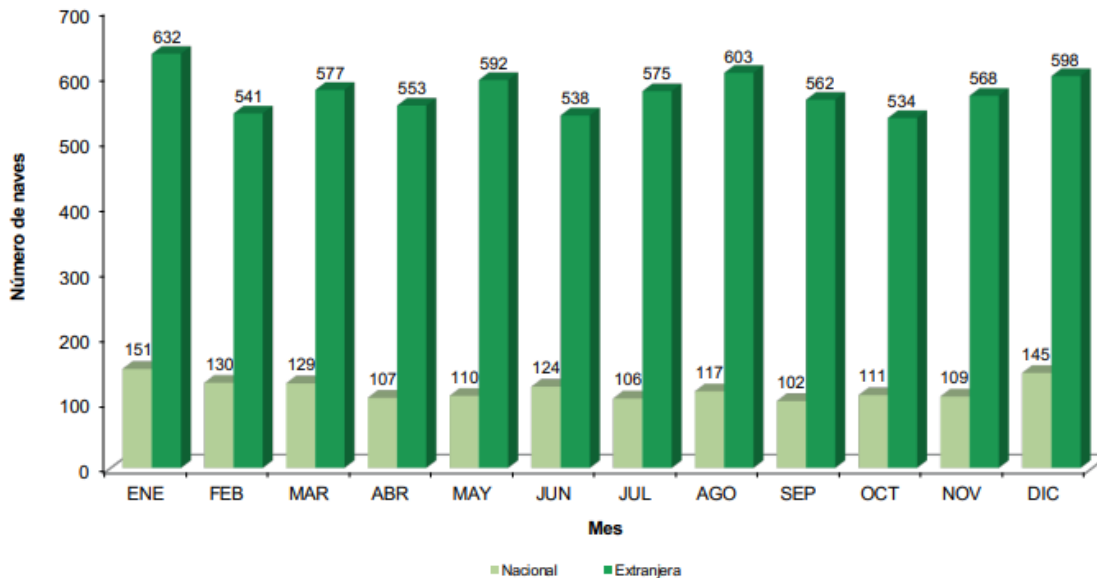


Figura 2.4: Naves nacionales y extranjeras recaladas en puertos nacionales año 2022 (Armada de Chile, 2023).

Es fundamental recalcar que toda embarcación que desee ingresar y fondear en aguas territoriales chilenas debe cumplir estrictamente con las normativas y convenios internacionales incorporados en la legislación del país. Dada la creciente actividad en la industria marítima, resulta imperativo tomar medidas concretas para reducir las emisiones contaminantes. Aunque los buques, en comparación con otros medios de transporte, generan una cantidad relativamente baja de emisiones, el objetivo sigue siendo su disminución constante, en un esfuerzo por minimizar el impacto ambiental.

2.5 Convenio MARPOL

Se estima que aproximadamente 70.000 naves estarán sujetas a cumplir con las nuevas normativas establecidas por la Organización Marítima Internacional (OMI) a través del convenio MARPOL.

Este convenio está dirigido a prevenir la contaminación originada por los buques y se crea en la década del 1970, dando respuesta a la necesidad de controlar la contaminación marítima ocasionada por los barcos debido al aumento exponencial que esta industria atravesó en aquella época. Fue la Organización Marítima Internacional (organismo especializado de la ONU) la que desarrolló el convenio, que fue adoptado en el año 1973.

Inicialmente MARPOL comprendía la contaminación acuática asociada a la generación de desechos durante los periodos de navegación de los buques, así como los vertimientos de hidrocarburos y aguas sucias, con una extensión de cinco anexos los cuales corresponden a:

- Anexo I: Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos.
- Anexo II: Reglas para prevenir la contaminación por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel.

- Anexo III: Reglas para prevenir la contaminación por sustancias perjudiciales transportadas por mar en bultos.
- Anexo IV: Reglas para prevenir la contaminación por las aguas sucias de los buques.
- Anexo V: Reglas para prevenir la contaminación por las basuras de los buques.

Si bien entre ellos no había ninguna regulación asociada a contaminantes atmosféricos, al momento de su publicación ya se encontraba en debate el impacto a la atmósfera propiciado por los gases de escape de esta actividad. La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano en el año 1972 fue un hito que marcó el inicio de la cooperación internacional para la lucha contra la acidificación o lluvia ácida.

En el año 1990 Noruega presenta ante el Comité de Protección del Medio Marino una visión general respecto a la contaminación atmosférica ocasionada por los buques, donde se estimó la emisión de dióxido de azufre entre 4,5 y 6,5 millones de toneladas por año, siendo casi un 4% de las emisiones mundiales de azufre, además los óxidos de nitrógeno se estimaron en unos 5 millones de toneladas al año, casi el 7% a nivel mundial (OMI, 2024).

Así es como el año 1997 se integra al convenio el anexo VI referente al control de contaminantes atmosféricos y sustancias que agotan la capa de ozono asociados a las actividades de navegación con el fin de reducir estos compuestos y disminuir el impacto hacia el medio ambiente.

En el anexo VI del convenio se impone un límite máximo de contenido en azufre de 0,5% m/m. Además, este convenio permite a los países delimitar zonas de control de emisiones, teniendo en cuenta las características particulares de la fauna y flora en cada región, para proteger la biodiversidad marina dando mayores restricciones de emisión en estas zonas.

Una de las alternativas más viables para reducir la emisión de óxidos de azufre producto del contenido de azufre en el combustible es el uso de alternativas como el VLSFO (Very Low Sulphur Fuel Oil), no obstante, esta solución no es siempre viable debido a sus costos o dificultad de obtención. Por esta razón, dentro del convenio se impulsa a utilizar tecnologías de lavado de gases u otras alternativas técnicas que puedan limitar las emisiones principalmente de SO₂.

Los sistemas de control de emisiones jugarán un papel crucial en la reducción de la liberación de contaminantes a la atmósfera en el corto plazo. A su vez, se están investigando y desarrollando tecnologías más innovadoras que prevengan la generación de estos contaminantes, como la adopción de energías renovables (como la energía solar) y otras alternativas carbono neutrales, entre ellas el prometedor hidrógeno verde.

En la actualidad para el ámbito marítimo se utilizan únicamente los sistemas de lavadores de gases de tipo scrubber, donde los gases de escape se dirigen hacia una cámara equipada con un sistema de boquillas por las que circula agua en forma de lluvia, el gas se encuentra a contracorriente con el agua donde esta última capta las partículas de SO_x, NO_x y materiales particulados, conteniendo los contaminantes en el fondo y dejando salir gas más limpio al exterior.

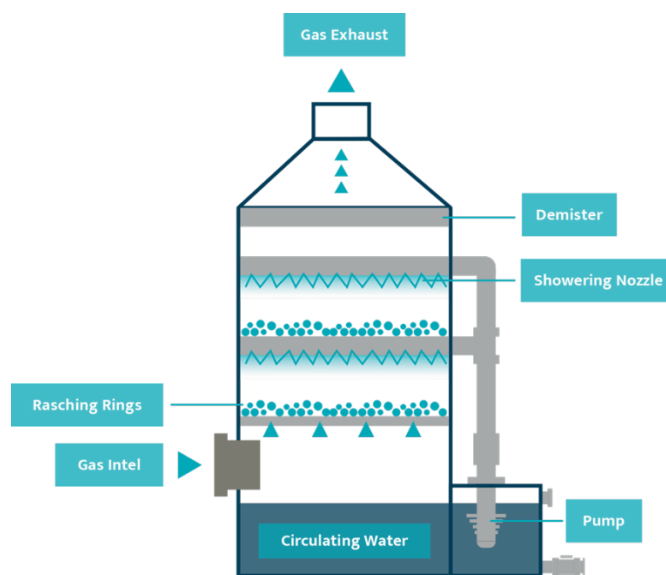


Figura 2.5: Cómo elimina los gases un Scrubber (Tecam, 2024).

Este tipo de equipos puede ser útil para gases como el SO_x debido a su alta solubilidad en agua, por otro lado, también puede servir para disminuir la cantidad de NO_x que se libera al ambiente.

Dentro de las embarcaciones hay distintas configuraciones de estos scrubber de acuerdo con el trato que se le da a la mezcla del agua que capturó los compuestos nocivos, pueden ser de tipo húmedo o seco. Dentro de los scrubber de tipo húmedo se pueden encontrar tres tipos:

- Abierto
- Híbrido
- Cerrado

Aquellos de tipo abierto llevan a cabo la captación de los gases de escape incorporando al proceso agua de mar, sin embargo, el agua residual es tratada y expulsada inmediatamente fuera del barco, lo que puede ser considerado altamente contraproducente pues de todos modos induce la acidificación del océano.

Por otro lado, el de tipo híbrido puede liberar esta agua, como también puede almacenarla hasta llegar a puerto para ser eliminada.

Finalmente, el de tipo cerrado en su proceso utiliza una sustancia química alcalina como el hidróxido de sodio que puede ser mezclado con agua dulce, captando el SO_x y formando un desecho espeso al cual únicamente se le permite su almacenamiento hasta la llegada a puerto donde puede ser descargado y tratado correctamente.

Adicionalmente existe un scrubber de tipo seco que, como su nombre indica, funciona sin necesidad de agua. Utiliza gránulos de cal hidratada, y tiene la ventaja de que debido a la alta temperatura de

su funcionamiento se queman las partículas de hollín y los residuos aceitosos que puedan encontrarse en el gas (Bonet, M. 2020).

Los residuos que se generan a partir de este tipo de tratamiento de gases deben ser debidamente tratados, por lo que la autoridad marítima en Chile ha dispuesto normas de cómo se debe llevar a cabo la recepción de estos desechos desde las embarcaciones a tierra firme, por medio de entidades autorizadas para este tipo de tareas, disminuyendo así la probabilidad de accidentes o vertimientos de estos residuos al medio marino

A pesar de que estos son los equipos que se utilizan mayoritariamente como alternativa al cambio de combustible por uno más limpio, existen otras formas de mitigar los gases de combustión que pueden ser aplicados previo a la reacción de combustión o posterior a esta, algunos se utilizan comúnmente en automóviles o en calderas para controlar sus emisiones como la urea en los sistemas de reducción catalítica por medio de un líquido reductor, la inyección de gases de escape recirculados a la admisión de los motores que ha demostrado disminuir las emisiones de NO_x , la conversión a sistemas de combustión de gas que genera emisiones menores a las del diésel, entre otros.

Según el informe medioambiental de la unión europea, se ha registrado una disminución en las concentraciones de contaminantes como el SO_x , el NO_x y el material particulado según las estadísticas de su registro de emisión y transferencia de contaminantes, donde están consideradas las emisiones asociadas al transporte marítimo. Esto se puede apreciar en la figura 2.6.

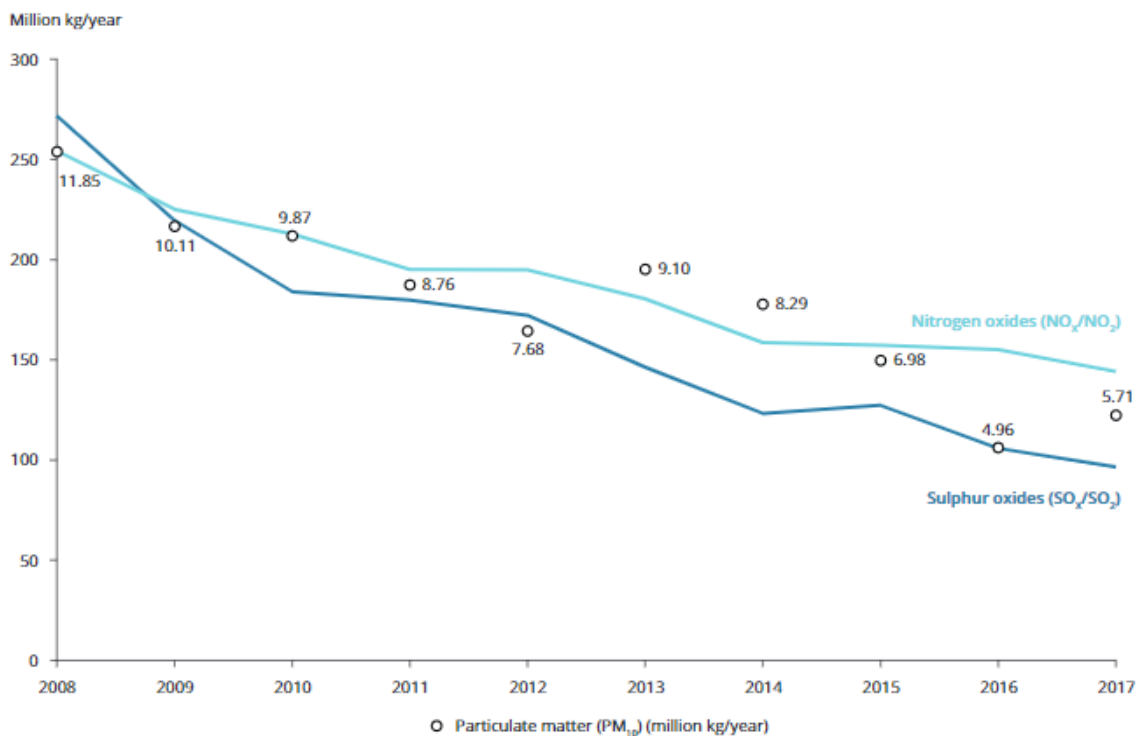


Figura 2.6: Emisión total de contaminantes atmosféricos del E-PRTR en un radio de 2 km de los puertos (European Environment Agency, 2021).

En Chile las emisiones del transporte marítimo no se consideran en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, sin embargo, es posible conocer la concentración de ciertos contaminantes atmosféricos gracias a estaciones de monitoreo con representatividad poblacional en el Sistema de Información Nacional de Calidad de Aire. Si bien no todas las estaciones miden los mismos contaminantes y tampoco existen estaciones a lo largo de todo el país, es posible visualizar en algunas zonas costeras las concentraciones de SO_x y NO_x, por ejemplo, en la comuna de Quintero se encuentran mediciones para ambos compuestos como se puede ver en la figura 2.7 y en la figura 2.8 para dióxidos de azufre y óxidos nitrosos respectivamente.

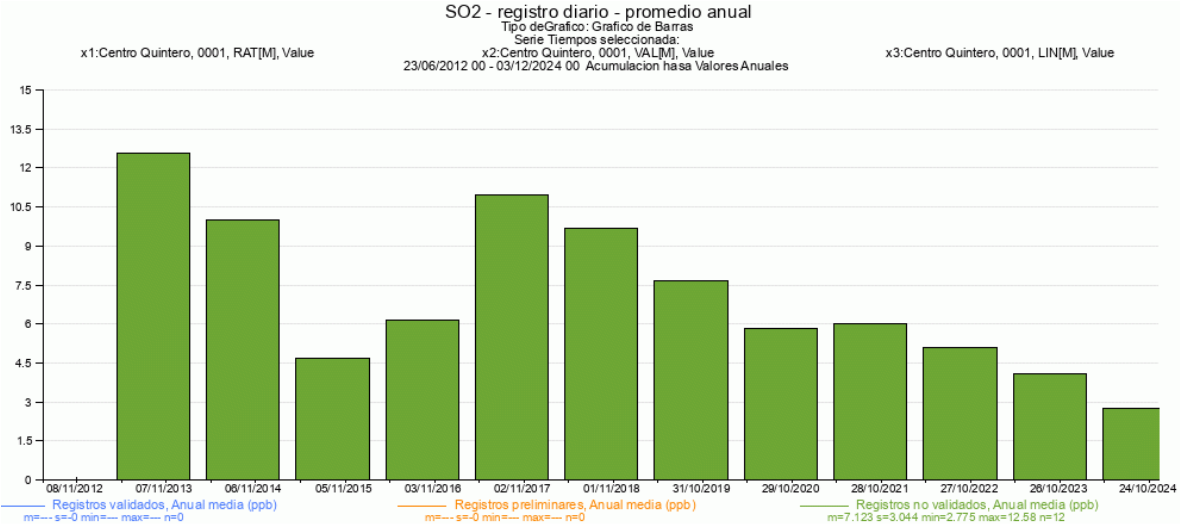


Figura 2.7: Concentración promedio anual de SO₂ en EMRP "Centro Quintero". (Sistema de Información de Calidad del Aire, 2024).

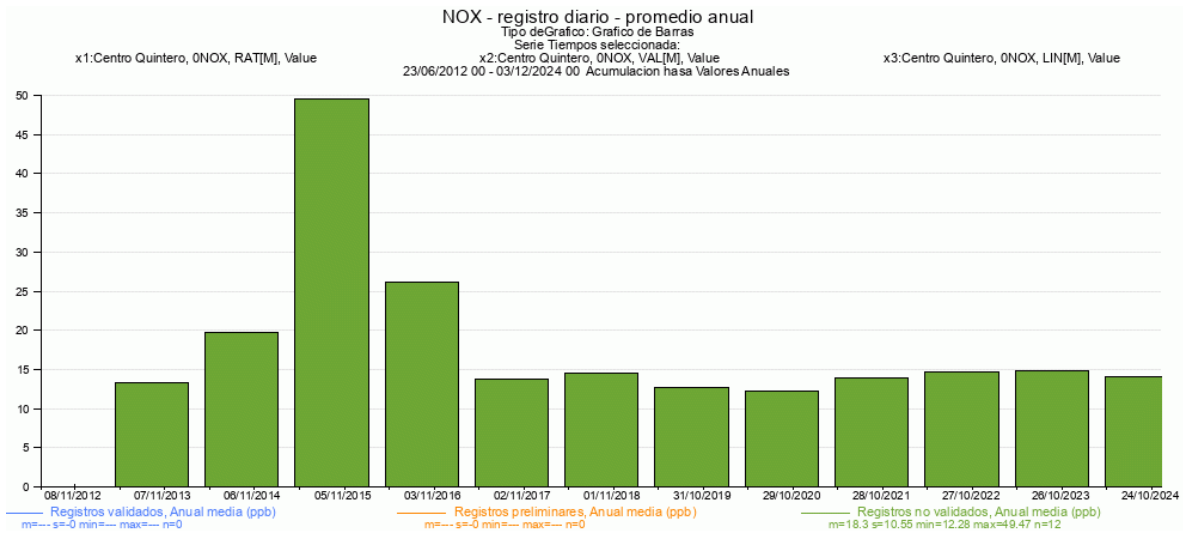


Figura 2.8: Concentración promedio anual de NOx en EMRP "Centro Quintero". (Sistema de Información de Calidad del Aire, 2024).

Estas mediciones corresponden a la Estación de Monitoreo con Representatividad Poblacional denominada "Centro Quintero", y pueden entregar información importante de la calidad del aire asociada a zonas con gran actividad marítima como lo es la comuna de Quintero.

3. Problema

La creciente dependencia global del transporte marítimo para la movilización de mercancías ha traído consigo un incremento significativo en las emisiones de gases contaminantes, tales como óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM). Estos contaminantes, liberados por los motores de las embarcaciones, no solo contribuyen al cambio climático, sino que también son precursores de problemáticas ambientales de gran magnitud, como la acidificación de los océanos, la contaminación atmosférica y la formación de lluvia ácida. Estas emisiones impactan negativamente la biodiversidad marina y terrestre y representan riesgos importantes para la salud humana, especialmente en áreas costeras y portuarias donde la actividad marítima es intensa.

Para mitigar estos efectos, se han implementado regulaciones internacionales, siendo el Convenio MARPOL la única normativa global específica para la actividad marítima. La Organización Marítima Internacional (OMI), ha promovido la adopción de MARPOL como una medida para combatir el cambio climático y reducir el impacto ambiental del transporte marítimo. Sin embargo, debido a la gran escala y diversidad de esta actividad, resulta necesario evaluar la efectividad de MARPOL en la reducción de emisiones contaminantes y explorar oportunidades para complementarlo con nuevas tecnologías y normativas, que hagan de la industria marítima una actividad más sostenible y respetuosa con el medio ambiente.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general:

-Evaluar la efectividad de los criterios establecidos en el convenio MARPOL como sistema de control de emisiones de las embarcaciones marítimas proponiendo alternativas técnicas complementarias para asegurar la reducción de su impacto ambiental.

4.2 Objetivos específicos:

- Analizar normativas internacionales que regulan las emisiones de gases de combustión provenientes de la actividad marítima.
- Analizar la concentración de las emisiones de un caso de estudio para evaluar la efectividad del criterio MARPOL en la reducción de dichas emisiones.
- Proponer alternativas técnicas para complementar lo establecido por el Convenio MARPOL, de forma de asegurar la emisión de gases más limpios.

5. Revisión bibliográfica

Pino. A (2017), en su memoria de titulación llamada “Estimación de emisiones contaminantes atmosféricas producidas por embarcaciones marítimas en Chile” para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico con mención en energía, queda reflejada la gran cantidad de emisiones que genera el sector marítimo, dando como resultado una cantidad de NO_x aproximada de 12.017 toneladas, de CO₂ en 614.726 toneladas, así como también 189 toneladas de material particulado 2,5. Indica que la región que más aporta emisiones de este tipo asociadas a la actividad de la marina mercante es la región de Valparaíso.

Armada de Chile (2023), en su Boletín Estadístico Marítimo y en su Boletín Estadístico Portuario muestran la amplia circulación de naves extranjeras en comparación a la cantidad de naves nacionales en territorio marítimo chileno y sus puertos.

European Environment Agency (2021), en su informe medioambiental sobre el transporte marítimo europeo indica que el transporte marítimo es el responsable del 13,5% de las emisiones totales del sector transporte en el año 2018 en la unión europea, e indica una serie de normativas asociadas a este sector en específico para fortalecer la disminución de estas emisiones.

Organización Marítima Internacional (1973), en el “Convenio para Prevenir la Contaminación por Buques” dentro del anexo VI establece límites de emisión de los óxidos de azufre y de los óxidos nitrosos con el fin de implementar una normativa generalizada para todos los países participantes, dando especial cuidado a las zonas marinas especialmente sensibles delimitadas por la misma organización.

6. Metodología

6.1 Analizar normativas internacionales que regulan las emisiones de gases de combustión provenientes de la actividad marítima.

El primer objetivo específico se desarrolló por medio de una recopilación detallada de las normativas sobre emisión de gases de escape de motores diésel en el ámbito marítimo a nivel nacional e internacional, así como la identificación de los criterios planteados en el convenio MARPOL.

Se revisó la legislación de ciertos países que se encontraban adscritos a MARPOL para realizar una correcta comparación entre lo establecido por el convenio y las posibles normas adicionales con las que contara cada país.

Adicionalmente se recopiló normativa nacional sobre emisiones de SO_x, NO_x y material particulado que no tuviesen un enfoque en el ámbito marítimo para contrastar los valores límites.

Para la identificación de las normativas recopiladas se realizó una tabla bajo el esquema de la tabla 6.1 que facilita su visualización, incluyendo el país al que corresponde la norma, nombre de la norma o legislación, una breve descripción del contenido y los valores límites establecidos tanto para el contenido en combustible como valor límite de emisión.

Tabla 6.1: Formato de identificación de normativas.

País	
Normativa	
Contenido	
Valor límite combustible	
Valor norma	

Una vez recopiladas las diferentes normativas se realizó un análisis de ellas para identificar aquellas que pudieran ser más restrictivas que lo establecido mediante el convenio.

6.2 Analizar la concentración de las emisiones de un caso de estudio para evaluar la efectividad del criterio MARPOL en la reducción de dichas emisiones.

Para la realización del segundo objetivo específico sobre la estimación de la concentración de emisiones en un caso de estudio se solicitaron datos históricos de la Armada de Chile por medio de OIRS, con los registros de los buques mercantes circulantes en territorio marítimo chileno durante los años 2022 y 2023 donde se debía indicar como mínimo el tipo de buque, puerto de origen, puerto de destino y fechas de zarpe y arribo.

Se definió un caso de estudio que tuviera una cantidad de movimientos significativa para tener un tamaño de muestra representativa, además el buque elegido como caso de estudio debió estar matriculado bajo bandera chilena con la finalidad de enfocar el estudio a territorio nacional.

Se determinó por medio de un análisis cuantitativo la cantidad de millas náuticas recorridas por año, para lo cual se utilizó la calculadora de distancias de navegación de la página Bednblue (Bednblue, 2024), ubicando los puertos de origen y destino del buque procurando que la ruta trazada fuera la más directa posible entre ellos.

A partir de las millas náuticas recorridas se evaluó la cantidad de combustible consumido para posteriormente estimar la emisión de SO_x de acuerdo con el contenido de azufre en el combustible dictaminado en el convenio MARPOL y la estimación de la emisión de SO_x considerando un 3,5% en peso de contenido de azufre poniéndose en el caso de que el convenio no se aplicara. Para lo anterior se usó la reacción expuesta anteriormente en la ecuación 2.5.

Para la estimación del NO_x y material particulado se utilizó el documento AP-42 de la EPA (Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos, 1996) en su tercer capítulo sobre fuentes estacionarias de combustión interna, utilizando los factores de emisión correspondientes a cada uno de los compuestos.

Se evaluó la eficacia de la implementación del criterio MARPOL comparando las emisiones que se detectaron ante su implementación con las emisiones producidas si no se contara con dicho convenio.

Se consultó a la autoridad marítima sobre la existencia de información estadística sobre las emisiones del sector, además de recopilar la información disponible en línea o en los registros de entidades como la Organización Marítima Internacional para dilucidar el impacto que ha tenido la medida.

6.3 Proponer alternativas técnicas para complementar lo establecido por el Convenio MARPOL, de forma de asegurar la emisión de gases más limpios.

Para el tercer objetivo específico se realizó una revisión bibliográfica de distintos estudios previos que se relacionen con el tema de mitigación de emisiones en buques como trabajos de titulación,

investigaciones de expertos, estudios de organizaciones mundiales o entes reguladores. Además de investigar sobre distintas alternativas técnicas innovadoras que permitan disminuir la liberación de óxidos nitrosos o material particulado como producto de la reacción de combustión de los motores diésel marinos.

Se utilizó un formato de identificación de las alternativas utilizadas para mitigación de emisiones en barcos siguiendo la tabla 6.2, donde se registraron ventajas y desventajas de las opciones.

Tabla 6.2: Formato de identificación de alternativas.

Tipo de técnica	Ventajas	Desventajas

Posteriormente se especificó un conjunto de tecnologías sin consolidar, explicando los beneficios que se esperan de cada una y el estado en que se encuentra su desarrollo.

7. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a lo largo del estudio, en respuesta a los objetivos específicos planteados al inicio del trabajo. Los resultados se organizan de acuerdo con dichos objetivos, con el propósito de mantener una estructura coherente que facilite la comprensión del contenido. A continuación, se detallan los hallazgos más relevantes, los cuales responden directamente a los objetivos de la investigación y aportan una visión clara de los aspectos clave analizados.

7.1 Analizar normativas internacionales que regulan las emisiones de gases de combustión provenientes de la actividad marítima.

A partir del objetivo específico 1 se realizó una revisión bibliográfica a la normativa tanto nacional como internacional asociada a las emisiones que generan los buques por medio de sus gases de escape y cualquier otra normativa relevante para el desarrollo de la investigación. Se lograron identificar diferentes cuerpos legales que se presentan a continuación en la tabla 7.1, es importante destacar que en la mayoría de los casos las normas de los países se adecuan principalmente a los valores establecidos por la OMI en el convenio MARPOL con el objetivo de mancomunar los esfuerzos y reforzar la transición paulatina hacia esta disminución de sus emisiones.

Tabla 7.1: Normativa recopilada.

País	Internacional
Normativa	Convenio para la prevención de la contaminación por buques
Contenido	Anexo VI referente al contenido de azufre y otras emisiones atmosféricas de los buques
Valor límite combustible	Límite de 0,5% de azufre en el combustible a partir del año 2020 a nivel mundial Límite de 0,1% de azufre en el combustible a partir del año 2020 en zonas ECA
Valor norma	Límite Tier I, II y III para No _x
País	España
Normativa	Real Decreto 1042/2017
Contenido	Limitación de emisiones para instalaciones de combustión medianas entre 1 y 50 MW
Valor límite combustible	-
Valor norma	SO _x 120 mg/Nm ³ No _x 190 mg/Nm ³ MP 10 mg/Nm ³
País	Unión Europea
Normativa	Directiva 2016/802/UE
Contenido	Limitación del contenido de azufre en combustibles

Valor límite combustible	Azufre no superior a 0,5% en masa a partir del 2020 en la Unión Europea
	Azufre no superior a 0,1% en masa para las zonas de control de emisiones (ECA)
Valor norma	-
País	Estados Unidos
Normativa	Tier III
Contenido	Establece límites a la emisión de motores diésel marinos y otros motores fabricados a partir de 2012 entre 37 kW y 560 kW
Valor límite combustible	-
Valor norma	No _x 3,4 g/kWh
	MP 0,20 g/kWh
	CO 5,0 g/kWh
	HC 0,19 g/kWh
País	Estados Unidos
Normativa	Tier IV
Contenido	Establece límites de emisión a motores diésel marinos fabricados a partir de 2014 con potencia superior a 560 kW
Valor límite combustible	-
Valor norma	NO _x 0,4 g/kWh
	MP 0,02 g/kWh
	CO 5,0 g/kWh
	HC 0,19 g/kWh
País	Japón
Normativa	Ley de prevención de la contaminación del mar y la promoción del tratamiento de residuos marinos
Contenido	Proteger el medio marino y la salud pública alineando esfuerzos con el convenio MARPOL
Valor límite combustible	Límite de 0,5% de azufre en el combustible a partir del año 2020 a nivel mundial
	Límite de 0,1% de azufre en el combustible a partir del año 2020 en zonas ECA
Valor norma	Límite Tier I, II y III para No _x
País	Chile
Normativa	Circular marítima A-52/001
Contenido	Procedimiento recepción de residuos MARPOL
Valor límite combustible	-
Valor norma	-
País	Chile
Normativa	Decreto Supremo N°103 de 2019
Contenido	Establece especificaciones de calidad de combustibles líquidos de uso marino
	Petróleo diésel uso marino azufre máximo 0,5% masa/masa

Valor límite combustible	Petróleo residual uso marino azufre máximo 0,5% masa/masa	
Valor norma	-	
País	Chile	
Normativa	Decreto Supremo N°104 de 2018	
Contenido	Norma de calidad primaria para SO ₂	
Valor límite combustible	-	
Valor norma	350 ug/Nm ³ en 1 hora	
	150 ug/Nm ³ en 24 horas	
	60 ug/Nm ³ anual	
País	Chile	
Normativa	Decreto Supremo N°22 de 2009	
Contenido	Norma de calidad secundaria de SO ₂	
Valor límite combustible	-	
Valor norma	Zona norte	1000 ug/Nm ³ en 1 hora
		365 ug/Nm ³ en 24 horas
		80 ug/Nm ³ anual
	Zona sur	700 ug/Nm ³ en 1 hora
		260 ug/Nm ³ en 24 horas
		60 ug/Nm ³ anual
País	Chile	
Normativa	Decreto Supremo N°40 de 2023	
Contenido	Norma de calidad primaria para NO ₂	
Valor límite combustible	-	
Valor norma	200 ug/Nm ³ en 1 hora	
	100 ug/Nm ³ en 24 horas	
	40 ug/Nm ³ anual	
País	Chile	
Normativa	Decreto Supremo N°12 de 2011	
Contenido	Norma de calidad primaria para MP 2,5	
Valor límite combustible	-	
Valor norma	50 ug/m ³ en 24 horas	
	20 ug/Nm ³ anual	
País	Chile	
Normativa	Decreto Supremo N°12 de 2021	
Contenido	Norma de calidad primaria para MP 10	
Valor límite combustible	-	

Valor norma	130 ug/Nm ³ en 24 horas
	50 ug/Nm ³ anual

En esta búsqueda se pudo identificar que la gran mayoría de los países que forman parte del Convenio Para Prevenir la Contaminación por Buques ha implementado normas que establecen los límites de contenido de azufre en 0,5% masa/masa desde el año 2020, además de restringir esta cifra a un 0,1% en masa en aquellas zonas denominadas “Zonas de control de emisiones de SO_x”, así como los distintos Tier que regulan las emisiones de NO_x.

Los Tier planteados por el convenio MARPOL corresponden a niveles de emisión de acuerdo con el año de construcción del buque y el régimen nominal del motor, es decir, las revoluciones por minuto del cigüeñal expresadas en el documento con la letra *n*. Hasta la fecha existen 3 niveles establecidos, en la tabla 7.2 se pueden ver los límites de emisión para el Tier I.

Tabla 7.2: Valores límite para Tier nivel I.

Nivel Tier	Fecha de fabricación	<i>n</i> [rpm]	Límite de emisión [g/kWh]
I	Desde 1 enero 2000 Previo a 1 enero 2011	< 130	17,0
		$130 \leq n < 2000$	$45 * n^{(-0,2)}$
		≥ 2000	9,8

Por otro lado, en la tabla 7.3 se pueden ver los valores límites correspondientes al Tier nivel II.

Tabla 7.3: Valores límite para Tier nivel II.

Nivel Tier	Fecha de fabricación	<i>n</i> [rpm]	Límite de emisión [g/kWh]
II	1 enero 2011 o posterior	< 130	14,4
		$130 \leq n < 2000$	$44 * n^{(-0,23)}$
		≥ 2000	7,7

El Tier III corresponde a la limitación de NO_x en las zonas de control de emisiones (ECA) como por ejemplo la zona de control de emisiones de Norteamérica, del mar Caribe de los Estados Unidos, del mar Báltico y el mar del Norte. A continuación, en la tabla 7.4 se pueden ver los límites establecidos para cada una de ellas.

Tabla 7.4: Valores límite para Tier nivel III.

Nivel Tier	Zona de control de emisiones	Fecha de fabricación	<i>n</i> [rpm]	Límite de emisión [g/kWh]
III	Norteamérica	1 enero 2016 o posterior	< 130	3,4
			$130 \leq n < 2000$	$9 * n^{(-0,2)}$

	Mar Caribe de los Estados Unidos		≥ 2000	2,0
III	Mar Báltico	1 enero 2021 o posterior	< 130	3,4
	Mar del Norte		$130 \leq n < 2000$	$9 * n^{(-0,2)}$
			≥ 2000	2,0

En la regla para óxidos nitrosos también se especifica que aquellos buques con un motor de potencia de salida superior a 5000 [kW] y una cilindrada igual o superior a 90 [L] instalados posterior al 1 de enero de 1990 y previo al 1 de enero de 2000 deben cumplir los límites de emisión del Tier nivel I expuestos anteriormente en la tabla 7.2.

El convenio MARPOL no cuenta con un límite de emisiones establecido para materia particulada, si bien nombra este contaminante en la regla 14 del anexo VI, no se regula su generación.

Se pudo identificar que Estados Unidos es un país más restrictivo respecto a la generación de compuestos como el NO_x , el cual ha implementado por medio de la EPA las normativas Tier III y IV, las cuales designan un valor límite para el NO_x por debajo del permitido en el convenio MARPOL.

Otro país que posee normas más restrictivas es España, donde el Real Decreto 1042/2017 indica valores límites de emisión de SO_x , NO_x y MP, el ámbito de aplicación de esta norma es para instalaciones de combustión medianas de entre 1 y 50 [MW], incluyendo cualquier dispositivo técnico para la propulsión de vehículos, buques o aeronaves. En este decreto se encontraron distintos valores límite de acuerdo con el tipo de instalación emisora, dentro de la norma en su anexo II se encuentra la tabla denominada “Valores límite de emisión [mg/Nm³] para los motores y turbinas de gas existentes”, valores que se pueden ver reflejados anteriormente en la tabla 7.1.

Adicionalmente se han añadido a la tabla 6.1 distintos decretos supremos que dictan normas de calidad primarias y secundarias para el territorio chileno con el fin de tener una base legal para efectos de comparación.

Se recopilaron normas de calidad primarias y secundarias para SO_2 , NO_x y material particulado que, si bien no están dirigidas a los gases de combustión, pueden ser útiles para tener una idea de las magnitudes de las emisiones. También se integró la norma de emisión para material particulado de equipos de combustión a leña y pellet con la misma finalidad.

La autoridad marítima en Chile posee una circular marítima con el protocolo a seguir para el correcto manejo de los distintos residuos generados por los buques en altamar y que desean ser eliminados en puertos chilenos, incluyendo los residuos denominados MARPOL, que hacen referencia a aquellos que se han creado por el proceso de lavado de gases que realizan los scrubber en aquellos buques que cuentan con esta tecnología, aquí se establecen los plazos de aviso y las entidades que tienen permitido retirar estos residuos.

Se identifica en Chile el D.S. N°103 sobre la calidad de los combustibles permitidos para el sector marítimo, por el cual ENAP se rige para la producción y venta de los combustibles.

7.2 Analizar la concentración de las emisiones de un caso de estudio para evaluar la efectividad del criterio MARPOL en la reducción de dichas emisiones.

Se obtuvo respuesta de parte de la Oficina de Información, Reclamos y Sugerencias de la DIRECTEMAR, quienes entregaron un documento tipo Excel denominado “REGISTRO” con la información sobre los despachos y recepciones portuarias de todos los buques mercantes entre los años 2022 y 2023.

Se trabajó con 46365 datos de todos los buques mercantes que entraron y navegaron a lo largo del territorio marítimo chileno. El documento contenía el nombre de cada buque seguido de la categoría de buque correspondiente de acuerdo con el tipo de carga que moviliza, señal de llamada, puerto de recepción o despacho, puerto de origen, número OMI, fecha de inicio del movimiento y fecha de finalización como se puede observar en la figura 7.1.

NOMBRE NAVE	CLASE	SEÑAL LLAMADA	PUERTO	PUERTO ORIGEN	NROmi	fh_inicio	fh_fin
-------------	-------	---------------	--------	---------------	-------	-----------	--------

Figura 7.1: Contenido documento DIRECTEMAR (Elaboración propia).

Existen distintas categorías de clase para los buques mercantes de acuerdo con la información entregada por la Armada. Se diferencian por el tipo de carga que movilizan o el uso que se le da a la embarcación. Cada una de las categorías se puede apreciar en la tabla 7.5.

Tabla 7.5: Categorías de buques de acuerdo con su función o mercancía.

Clase
Buque Tanque de líquidos especiales
Carga general
Carga refrigerada
Carga rodada
Científico
Embarcación deportiva costera
Embarcación deportiva de alta mar
Gasero
Granelero
Lancha de apoyo práctico
Para fines especiales

Pasaje
Pasaje cabotaje
Pasaje transbordo rodado
Petrolero
Portacontenedor
Rompehielos
Tanque Quimiquero
Tipo desconocido
Transbordador
Wellboat
Yate

Para la elección del caso de estudio se realizaron distintos filtros a los 46365 datos de los buques que navegaron costas chilenas a lo largo de los años 2022 y 2023, utilizando los datos de la hoja “Despachos”.

En primer lugar, se hizo un filtro a las clases de buques que fueran de uso diferente al transporte de mercancías como las embarcaciones con fines recreativos o aquellos con propósitos muy específicos como los científicos o los rompehielo, también se debieron descartar aquellos catalogados como tipo desconocido debido a la falta de información asociada a esta categoría. El fundamento de este filtro se debe a que la cantidad de movimientos no era significativa para ser representativa respecto al resto de buques mercantes o no cumplían con el enfoque de esta investigación.

Las categorías que se consideraron para la definición del caso de estudio fueron las planteadas en la tabla 7.6 que se adjunta a continuación.

Tabla 7.6: Clases de buques que pasaron el filtro.

Clase
Buque Tanque de líquidos especiales
Carga general
Carga refrigerada
Carga rodada
Gasero
Granelero
Pasaje
Pasaje cabotaje
Pasaje transbordo rodado
Petrolero
Portacontenedor
Tanque Quimiquero

Wellboat

Una vez aplicada la segregación de clase, se organizó por orden alfabético la columna “Nombre Nave” para identificar con mayor facilidad la cantidad de veces que figuró un mismo buque en la lista de despachos. El segundo filtro aplicado fue la cantidad de veces que cada embarcación figuraba en la lista, descartando a aquellos que tuvieran menos de 70 despachos en total durante los dos años analizados con el fin de mantener en el listado aquellas naves que tuviesen una cantidad considerable de movimientos dentro de territorio marítimo chileno.

En este punto, se pudo identificar que los buques de la clase wellboat, dedicados principalmente al transporte de peces vivos en tanques, eran los que más movimientos registraron, sin embargo, presentaban una complicación para trabajar con ellos al momento de la estimación de emisiones debido a que en todos los casos el puerto y el puerto de origen coinciden. Esto ocurre porque este tipo de embarcación zarpa desde un puerto en específico hacia mar adentro donde adquiere la mercancía, regresando al mismo punto de origen. Esto imposibilita la determinación de las millas náuticas que han recorrido los barcos durante sus periodos de trabajo.

Una vez descartados aquellos buques con menos de 70 viajes y los de tipo wellboat se aplicó un último filtro que consistió en verificar la bandera de las naves, con el fin de identificar aquellas embarcaciones nacionales para facilitar el proceso de búsqueda de información de características más específicas del ejemplar escogido en el caso de no encontrar dicha información en forma liberada.

Así se decidió trabajar con el buque denominado Condor, una embarcación de clase portacontenedores construida el año 1998 equipado con un motor MAN B&W 7S50MC-C, con un total de 146 viajes entre los años 2022 y 2023 frecuentando principalmente los puertos de San Antonio, Lirquén, Chacabuco y Punta Arenas.

Se realizó un documento Excel donde se tabularon los viajes del buque Condor separados por año, identificando por medio de una calculadora de distancias marítimas las millas náuticas de cada viaje realizado. Esta búsqueda arrojó que en el año 2022 y 2023 el Condor recorrió 54903,9 y 51781,2 millas náuticas respectivamente con una velocidad media de navegación de 20 nudos.

Se determinó el total de días con actividad que tuvo el Condor para cada año contrastando la fecha de inicio del despacho con la fecha de inicio de la recepción, asumiendo que el buque no realizó otras detenciones, manteniendo su velocidad constante en 20 nudos y que navegó las 24 horas de cada día contabilizado, se llegó a una cantidad de 237 y 225 días de actividad para los años 2022 y 2023 respectivamente.

Conociendo el modelo del motor equipado en el buque se buscó el manual de usuario, el cual entregó información valiosa referente a las características del equipo de combustión como la

potencia, las revoluciones por minuto y valores del consumo específico de combustible y consumo de aire como se pueden ver en la figura 7.2.

ISO ambient conditions

Specific Fuel Oil Consumption

Nominal Maximum Continuous Rating (NMCR)	g/kWh	175.0
SMCR	g/kWh	173.6
Optimising point	g/kWh	173.6
NCR	g/kWh	171.5

Exhaust Gas Amount

SMCR	kg/h	98,600
Optimising point	kg/h	98,600
NCR	kg/h	91,700

Exhaust Gas Temperature

SMCR	°C	244
Optimising point	°C	244
NCR	°C	232

Air consumption

SMCR	kg/s	26.9
Optimising point	kg/s	26.9
NCR	kg/s	25.0

Figura 7.2: Información del manual de motor (MAN diesel & turbo).

A partir de este manual se pudo determinar la potencia del motor correspondiente a 11060 [kW] y 127 revoluciones por minuto, además se utilizó la tabla de condiciones ambientales estándar definidas por la ISO.

De la tabla mostrada en la figura 7.2 se utilizaron los datos de consumo específico de combustible y consumo de aire que se indican como “SMCR”, lo cual significa “potencia máxima continua especificada”, esto quiere decir que corresponde al punto de operación del motor en el cual el fabricante ha especificado que el motor puede operar de manera continua bajo dichas condiciones sin sobrecargarlo ni dañarlo.

Se pudo estimar de acuerdo con la potencia y el consumo específico de combustible, que en el año 2022 el buque Condor con 54903,9 millas náuticas recorridas, requirió de 5270,8 toneladas de combustible. En el año 2023 con 51781,2 millas náuticas navegadas, el buque Condor requirió de 4971 toneladas de combustible.

Para determinar el volumen del consumo de aire utilizado en la combustión primero se debió determinar el volumen de aire normalizado de 1 [kmol] en las condiciones que indica la norma chilena, es decir, temperatura de 25 [°C] y 1 [atm] de presión, posteriormente se llevó el consumo de aire indicado por el manual a unidades de [Nm³/s] por medio de la ecuación 7.1

$$\text{Consumo de aire } \frac{\text{kg}}{\text{s}} * \text{Peso molecular del aire } \frac{\text{kmol}}{\text{kg}} * \text{Volumen aire } \frac{\text{Nm}^3}{\text{kmol}}$$

Ecuación 7.1

De esta forma se obtuvo el volumen de aire consumido correspondiente a 22,7 [Nm³/s].

Para el cálculo de la emisión de gases contaminantes como el SO_x se asumió el uso de IFO 380 y se consideró para ello la información entregada por ENAP respecto de este producto para uso en el ámbito marítimo, el cual indica que posee un contenido de azufre de 0,5% en peso de acuerdo a lo indicado por el convenio MARPOL y el Decreto Supremo N°103 de 2019, sin embargo, es en esta misma ficha técnica del producto donde se indica que en el caso de que la embarcación cuente con un equipo scrubber se le puede entregar combustible con un contenido de hasta 3,5% en peso de azufre como se puede apreciar en la figura 7.3.

PETRÓLEO COMBUSTIBLE IFO - 380*		
Propiedad	Requisito	Unidad
DS 103 de 2019		
Gravedad API A 60° F	Informar	°API
Densidad a 15 °C	máx. 991,0	kg/m ³
Agua	máx. 0,5	% (v/v)
Alumino + Silicio	máx. 60	mg/kg
Azufre	máx. 0,5 (b)	% (m/m)

Figura 7.3: Propiedades del petróleo IFO 380 de ENAP (Empresa Nacional del Petróleo, 2024).

Esto da a entender que sin el criterio MARPOL se podrían comerciar en Chile combustibles para uso marítimo con contenidos de azufre de 3,5% en peso o incluso superiores.

Para efectos del estudio, se realizó la estimación del SO_x en ambos casos, es decir, con un 3,5% y con un 0,5% en peso de azufre contenido en el combustible con el fin de determinar el impacto que tiene esta medida en la reducción de las emisiones.

Por medio de los diferentes cálculos efectuados se valoró la cantidad de azufre consumido por cada [Nm³] de aire durante el proceso de combustión, dando como resultado 396,7 [mg/Nm³] de azufre. Con este nuevo dato se pudo determinar la cantidad de SO₂ producido asumiendo un 100% de conversión de acuerdo con la reacción del azufre a dióxido de azufre ocasionado por la energía del proceso.

Conociendo la reacción, la estequiometría de cada elemento y los pesos moleculares correspondientes se pudo establecer que por los 396,7 [mg/Nm³] de azufre consumido se generaron 793,4 [mg/Nm³] de dióxido de azufre, esto se puede traducir a que en un año el buque mercante Condor generó 368,9 toneladas de SO₂.

El mismo ejercicio se realizó bajo la opción de combustible con un contenido más bajo al anterior, de 0,5% en masa. Con estas condiciones y bajo el mismo procedimiento anterior se valoró el azufre en 56,6 [mg/Nm³] y la emisión de SO₂ en 113,3 [mg/Nm³], traducido en 52,7 toneladas de dióxido de azufre en un año.

Para la estimación de las emisiones de NO_x se utilizó como herramienta el documento AP-42 de la EPA en su capítulo 3.4, donde se establecen factores de emisión en procesos de combustión interna de motores estacionarios, aplicable a los motores diésel marinos. En la tabla 7.7 se encuentra el listado con los factores de emisión fijados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos en el año 1996.

Tabla 7.7: Factores de emisión en procesos de combustión interna de motores estacionarios. (United States Environmental Protection Agency, 1996).

Pollutant	Diesel Fuel (SCC 2-02-004-02)			Dual fuel (SCC 2-02-004-02)		
	Emission Factor (lb/hp-hr) (Power output)	Emission Factor (lb/MMBtu) (fuel input)	EMISSION FACTOR RATING	Emission Factor (lb/hp-hr) (power output)	Emission Factor (lb/MMBtu) (fuel input)	EMISSION FACTOR RATING
NO _x						
Uncontrolled	0.024	3.2	B	0.018	2.7	D
Controlled	0.013 ^e	1.9 ^e	B	ND	ND	NA
CO	5.5 E-03	0.85	C	7.5 E-03	1.16	D
SO _x ^d	8.09 E-03S ₁	1.01S ₁	B	4.06 E-04S + 9.57 E-03S ₂	0.05S ₁ + 0.895S ₂	B
CO ₂ ^e	1.16	165	B	0.772	110	B
PM	0.0007 ^e	0.1 ^e	B	ND	ND	NA
TOC (as CH ₄)	7.05 E-04	0.09	C	5.29 E-03	0.8	D
Methane	f	f	E	3.97 E-03	0.6	E
Nomethane	f	f	E	1.32 E-03	0.2 ^g	E

Según el AP-42 como se puede apreciar, el factor de emisión del NO_x se establece en 0,024 [lb/hp*h], por lo que se realizó la conversión de la potencia del motor desde [kW] a [hp] para multiplicar por el factor de emisión y posteriormente convertir las unidades de [lb/h] a [mg/s] y dividir en el volumen de aire por segundo, resultando en 1974,9 [mg/Nm³] de NO_x equivalentes a 918,3 toneladas de NO_x al año.

La emisión de NO_x se llevó a las unidades especificadas por el criterio MARPOL, es decir, en [g/kWh]. Para esto se calculó la emisión en [g/h] para posteriormente dividir por la potencia del motor en [kW], dando como resultado 14,6 [g/kWh].

El material particulado también se ha estimado de acuerdo con lo establecido en el AP-42, como se puede ver en la figura 6.4 su factor de emisión corresponde a 0,0007 [lb/hp*h], y de la misma forma que los óxidos nitrosos, este valor se multiplicó por la potencia en [hp] del motor, posteriormente se convirtieron las unidades y se dividió en el volumen de aire consumido, dando como resultado 57,6 [mg/Nm³] de material particulado lo que se traduce a 26,7 toneladas al año de material particulado.

Con el fin de facilitar la comprensión de los resultados a partir de la estimación de emisiones a lo largo de este estudio se presenta a continuación la tabla 7.8 con un resumen de los valores obtenidos.

Tabla 7.8: Resumen de las estimaciones por cada contaminante.

Tipo de emisión	Emisión [mg/Nm³]	Emisión anual [Ton/año]
SO ₂ (0,5% azufre en masa)	113,3	52,7
SO ₂ (3,5% azufre en masa)	793,4	368,9
NO _x	1974,9	918,3
MP	57,6	26,7

A partir de las estimaciones realizadas, se observa que la aplicación del criterio MARPOL respecto al contenido de azufre en los combustibles reduce las emisiones de óxidos de azufre. Esto se refleja en la disminución de la emisión de SO₂ a 113,3 mg/Nm³ cuando se utiliza un combustible conforme a las regulaciones del convenio, en contraste con los 793,4 mg/Nm³ emitidos al emplear un combustible con un 3,5% de contenido de azufre en masa.

Por otro lado, la generación de NO_x no se ve afectada con el criterio MARPOL, ya que este regula la emisión del contaminante y no el contenido de su precursor como es el caso del azufre. En este caso de estudio la embarcación cumple con la norma establecida para aquellos buques construidos entre los años 1990 y 2000, que corresponde a una emisión de 17 [g/kWh] de óxidos nitrosos por lo que puede funcionar en aguas territoriales sin problema alguno.

Por medio de consultas a un experto en el área marítima se pudo determinar que Chile no tiene un inventario de emisiones de los buques que funcionan en territorio marítimo chileno. Según sus palabras, esto es algo que pretende implementar la autoridad marítima en la línea de la Ley por el cambio climático. Según estadísticas de la armada, el consumo promedio de combustible en buques mercantes de menores dimensiones y velocidad promedio que el Condor ronda las 4000 toneladas al año.

7.3 Proponer alternativas técnicas para complementar lo establecido por el Convenio MARPOL, de forma de asegurar la emisión de gases más limpios.

Si bien el convenio MARPOL para prevenir la contaminación por los buques propone una medida contundente para reducir la emisión de óxidos de azufre debido a la prevención de la formación de este compuesto gracias a la regulación del contenido de su precursor en el combustible, no disminuye por sí solo la emisión de óxidos nitrosos ni materia particulada.

Por otro lado, el convenio permite a las embarcaciones la utilización de tecnología de lavado de gases, siempre que este logre llevar las emisiones de SO_x hasta un valor equivalente al generado con combustibles de contenido 0,5% en masa de azufre, sin embargo, para el resto de los compuestos no se establece ninguna restricción específica que deba cumplir el equipo de lavado. Es por esta razón que en este apartado se plantean otras opciones distintas y complementarias al scrubber o lavador de gases para reducir directamente los NO_x y en menor medida el material particulado.

Por medio de la revisión bibliográfica de distintas tecnologías utilizadas para disminuir principalmente los NO_x se encontraron opciones más conocidas que algunos buques aplican para cumplir normativas más restrictivas de óxidos nitrosos como el Tier III. Estas opciones de mitigación se pueden ver en la tabla 7.9.

Tabla 7.9: Técnicas de mitigación conocidas.

Tipo de técnica	Ventajas	Desventajas
Sistema de Reducción Catalítica (SCR)	Efectiva en la reducción de NO_x	Necesita reposición del líquido catalizador
	Versátil y fácil de adaptar	
Recirculación de gases de escape (EGR)	Efectiva en la reducción de NO_x	Aumenta la emisión de material particulado
	Es económico	Disminución de la eficiencia del motor

Los sistemas de reducción catalítica son ampliamente conocidos principalmente en el mundo automotriz, ya que es común encontrar vehículos diésel con este sistema implementado para reducir las emisiones de óxidos nitrosos por medio de la inyección de un agente reductor de urea denominado comúnmente Adblue en la corriente de gases de escape, una vez que este líquido comienza a evaporarse debido a la temperatura de los gases de escape la urea se descompone en amoníaco y dióxido de carbono, en este punto es donde atraviesan una estructura metálica con elementos catalíticos que inducen la reacción de los óxidos nitrosos con el amoníaco, formando nitrógeno molecular y agua como podemos ver en la figura 7.5.

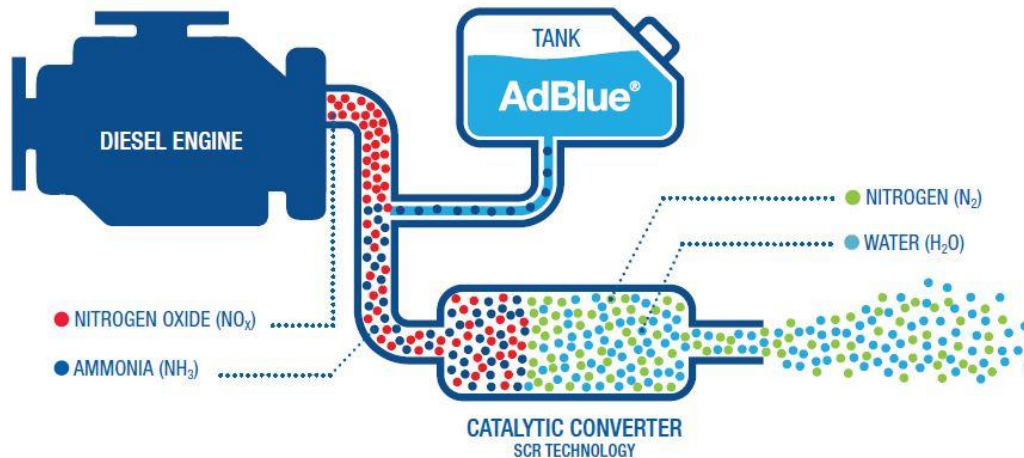


Figura 7.4: Distribución del sistema de reducción catalítica. (Ilpea, 2024).

Además, el SCR promueve un consumo más eficiente del combustible gracias a sus sondas lambda, que miden la composición de los gases de escape antes del sistema y posterior a él, ayudando a regular la combustión para reducir al máximo la generación de NO_x en este proceso. Es una alternativa altamente eficiente y sencilla de implementar debido a que no requiere de una gran cantidad de espacio para su instalación, sin embargo, el líquido reductor se va consumiendo lentamente durante su funcionamiento, por lo que requiere una reposición periódica.

La recirculación de gases de escape es otra de las técnicas conocida en el mundo automotriz y aplicable en el ámbito marítimo, consiste en recircular los gases de escape del motor con el fin de disminuir la cantidad de oxígeno que se admite y aumentar el vapor de agua en la cámara de combustión lo cual reduce la temperatura al momento de la combustión. Como sabemos, los óxidos de nitrógeno se forman gracias a las temperaturas altas, por lo que disminuirla evitará la formación de estos compuestos.

Uno de los problemas que tiene la EGR es relacionado a las partículas finas que se encuentran en la corriente de gases de escape, que con el tiempo se van acumulando y generando problemas en el funcionamiento normal del vehículo. Es por esta razón que se suele implementar en conjunto con un filtro de partículas para limpiar estos gases antes de recircularlos.

Otra característica importante de la EGR es que debe contar con un refrigerador de gases de escape para conseguir el efecto deseado de reducción de la temperatura de combustión, por lo que se deben considerar todos los elementos que se ven en la figura 7.6 para su implementación.

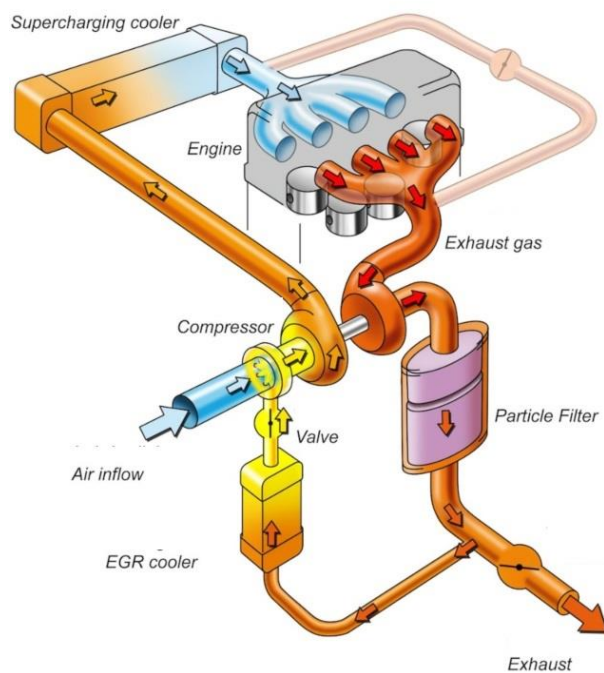


Figura 7.5: Distribución del sistema EGR (García, P. 2024).

Ambas técnicas son útiles para el control de emisiones en buques, sin embargo, como toda tecnología tiene ventajas y desventajas que son importantes de considerar al momento de elegir una de ellas para implementar, ya que pueden significar una mayor cantidad de mantenciones a lo largo de la vida útil de la unidad.

Adicionalmente a estas dos tecnologías descritas anteriormente, se pueden encontrar otras alternativas innovadoras para la disminución de las emisiones, algunas de las cuales se encuentran aún en investigación o no han sido aprobadas todavía para su utilización en el ámbito marítimo.

La utilización de gas natural licuado es una opción para considerar debido a la casi nula emisión de SO_x y material particulado además de una baja emisión de NO_x , prometiendo ser un combustible revolucionario para la transición energética y el cumplimiento de los objetivos de reducción de emisiones que ha fijado la OMI. Su adopción en la industria se ha llevado a cabo por medio de motores duales que funcionan con GNL y petróleo, o motores creados únicamente para funcionar con GNL. En la actualidad, los buques metaneros son los que han marcado la pauta en este tipo de transición, ya que cuentan con el sistema de almacenamiento de gas integrado debido a que movilizan GNL desde un puerto a otro.

Sin embargo, esta alternativa de combustible no es tan fácil de implementar debido a que en la actualidad no hay una gran oferta de este gas para uso marítimo, principalmente por falta de infraestructura necesaria para surtir a los barcos, aunque ya se está trabajando en mejorar el sistema de abastecimiento por medio de maniobras búnker. Por otro lado, otra barrera para su implementación es la mayor necesidad de espacio para los tanques capaces de contener el gas

licuado y la adaptación de todo el sistema de propulsión a este tipo de combustible, además del riesgo de fuga que este tiene debido a su estado gaseoso.

Siguiendo esta línea del cambio en el tipo de combustible utilizado, una opción que cada vez suena más fuerte es la de los buques de hidrógeno, que utilizan como fuente energética este compuesto, esto significaría una reducción casi total de las emisiones de gases de escape en los buques. El hidrógeno verde pareciera ser el combustible ideal, sin embargo, debido a la escasez de este compuesto de forma natural en el ambiente es que se debe fabricar, por lo que se denomina vector energético. La forma de utilizarlo debe ser por medio de pilas de combustible, las cuales son definidas como un convertidor electroquímico directo de energía, convirtiendo el hidrógeno en energía eléctrica que sería aprovechada para la propulsión y otras funciones de cada buque.

Este tipo de alternativa ya se está llevando a cabo por medio de prototipos como el buque Gaia de la empresa LH2 Europe junto con C-job Naval Architects quienes desarrollaron un diseño inicial de buque cisterna de hidrógeno. Sin perjuicio de lo anterior, este sistema sigue presentando desafíos como la temperatura a la que debe ser almacenado el hidrógeno, la gran cantidad de espacio que se le debe destinar en relación con una determinada cantidad de energía debido a la baja densidad del hidrógeno, entre otros aspectos que dificultan aún su pronta masificación.

Otra innovación es la utilización de plasma no térmico para el control de emisiones, esta técnica consiste en la utilización de electricidad estática propiciando la formación de radicales libres haciendo transitar los gases que se desean tratar por medio de un reactor de tipo DBD (Descarga de Barrera Dieléctrica) como se puede ver en la figura 7.7.

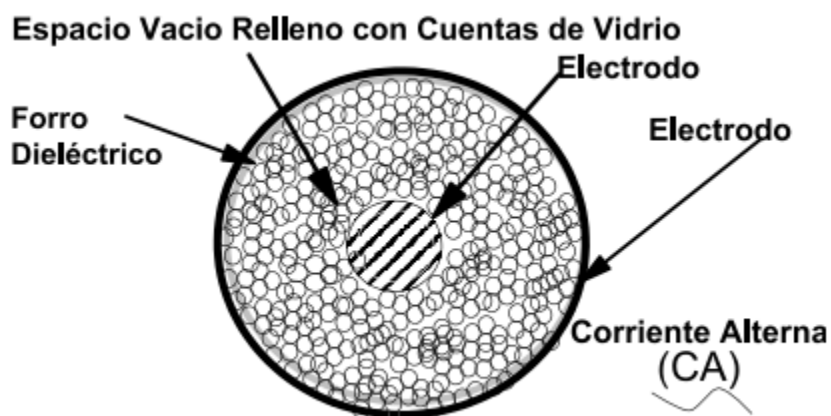


Figura 7.6: Reactor DBD. (United States Environmental Protection Agency, 2005).

Este método puede ser efectivo para revertir la formación NO_x y tiene potencial para mitigar el SO_x (United States Environmental Protection Agency, 2005). Sin embargo, esta tecnología que lleva tiempo existiendo no ha tenido tanta popularidad para la reducción de emisiones, los estudios se han centrado principalmente en su uso beneficioso para la eliminación de gérmenes en el área alimentaria y de la salud.

8. Discusión

Debido al crecimiento de la flota mercante en los años 70, distintas entidades principalmente gubernamentales vieron con preocupación el aumento significativo de la contaminación ambiental tanto marítima como atmosférica producida por los buques, a partir de esta preocupación se impulsó por parte de la OMI la implementación de un convenio que comprendía una serie de medidas con el fin de disminuir los efectos que estaba teniendo la industria marítima con un enfoque en el vertimiento de desechos, hidrocarburos y las mercancías, y posteriormente con las emisiones atmosféricas. Este conjunto de reglas denominado Convenio para la Prevención de la Contaminación por los Buques (MARPOL) donde los países que forman parte de este convenio deben asegurar su cumplimiento.

Si bien la medida se ha adoptado con bastante compromiso de parte de los países, es posible notar que los esfuerzos por reducir estas emisiones no son iguales para todos. Algunos estados han implementado normativas específicas paralelas a las impuestas por la OMI para regular las emisiones atmosféricas de los buques, entre ellos España con el Real Decreto 1042/2017 que fija límites de emisión de SO₂, NO_x y material particulado, esto es novedoso ya que el MARPOL no regula la emisión como tal de SO₂ y no propone ninguna medida directa para reducir las partículas. Por otro lado, Estados Unidos cuenta con normativas Tier para óxidos de nitrógeno (y otros compuestos) más estrictas que las planteadas por el convenio.

En Chile se puede ver que no hay regulaciones diferentes a las de MARPOL para la regulación de los gases de escape de los buques, si bien existen algunas normativas de calidad asociadas a compuestos como el dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y material particulado, este tipo de normas no regulan la emisión como tal, ya que se enfocan en la concentración de cada compuesto en el aire de cada punto de monitoreo con representatividad poblacional. Existe una norma de emisión de material particulado, sin embargo, se dirige a artefactos que combuscionen pellet y madera, por ende, no es aplicable a motores de combustión interna.

Esto deja abierta la puerta a la posibilidad de aplicar otras normas que incrementen el control de los gases y disminuyan el impacto ambiental, como por ejemplo lo han hecho España y Estados Unidos. Como indica Carrere, M. en su nota “Acuerdos para reducir las emisiones del transporte marítimo son consideradas ‘débiles’ por organizaciones ambientales” países como Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, la Unión Europea y los Estados Insulares del Pacífico durante la cumbre del comité de protección del medio marino MEPC 80 abogaron por una reducción total de las emisiones antes del año 2030, sin embargo, países como China, Argentina, Ecuador, Brasil, Perú y Chile se opusieron a esta propuesta, derivando en un acuerdo más débil que implica reducir en un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero al año 2030.

Es complejo llegar a acuerdos de nivel internacional, puesto que, como dice Lupano, J. A. en su informe “Desafíos ambientales y regulatorios del transporte marítimo en América del Sur” para la CEPAL, naturalmente habrá mayor disposición de parte de aquellos países que se ven más expuestos

al calentamiento global, que tienen potencial de desarrollo y producción de combustibles verdes y aquellas navieras con mayor tráfico mundial debido a la facilidad que tienen para acceder a alternativas tecnológicas de bajas emisiones. Sin embargo, debido al aumento de los costos que implica un incremento en las regulaciones, aquellos países geográficamente alejados o aquellos países con economías menos estables se mostrarán reticentes a la adopción de medidas.

De acuerdo con el objetivo específico dos de este trabajo se ha determinado que la adopción de medidas MARPOL son útiles para el buque Condor en reducir la emisión de óxidos de azufre controlándolos por medio de la disminución del contenido de azufre en el combustible utilizado, poniéndose en el caso donde, de no existir el convenio, el combustible contara con un contenido de azufre de 3,5% en masa. Respecto a los óxidos nitrosos y el material particulado del caso de estudio no se observa ninguna mejora con la aplicación del criterio MARPOL debido a que el buque cumple con la normativa Tier para buques construidos antes del año 2000, no obstante, la cantidad de óxidos de nitrógeno y MP emitidos sigue siendo alta si la miramos bajo la norma española del Real Decreto 1042/2017, y de haber sido construido en años posteriores al 2014 tampoco podría cumplir la norma Tier IV de Estados Unidos.

Si bien en Chile un barco con las características del Condor puede funcionar sin mayor problema rigiéndose por lo estipulado en el convenio MARPOL, en España este buque quedaría con prohibición de funcionamiento. Así se puede ver que este tratado demuestra eficiencia, sin embargo, se podría fortalecer si se alinea con los esfuerzos que presentan otros países.

Es preocupante ver que desde la puesta en marcha de MARPOL, Chile no ha profundizado en investigar y llevar un inventario de las emisiones que están generando las embarcaciones internacionales que navegan día a día en sus costas. Si bien la autoridad marítima tiene conocimiento de las emisiones que pueden llegar a producir aquellas embarcaciones con matrícula chilena y que navegan aguas internacionales, además de poseer estadísticas sobre las cantidades de combustible que consume la marina mercante, no existe hasta el momento una certeza de cuál es el impacto que tiene el alto tráfico marítimo internacional en este país, por lo que es difícil evaluar los beneficios que le ha traído MARPOL. La principal fuente de información en este aspecto proviene de trabajos de título como por ejemplo el documento mencionado en la revisión bibliográfica de este trabajo, denominado "Estimación de emisiones contaminantes atmosféricas producidas por embarcaciones marítimas en Chile" (Pino. A, 2017) donde se plantea que el sector marítimo genera alrededor de 12.017 toneladas de óxidos de nitrógeno, 189 toneladas de material particulado 2,5 y 614.726 toneladas de CO₂.

En Chile no existen zonas de control de emisiones declaradas, a diferencia de la unión europea donde se han declarado SECA el Mar del Norte y el Mar Báltico donde se permite un máximo de 0,1% en peso de azufre en los combustibles, atenuando en un 60% la concentración de SO₂ en dichos lugares.

De acuerdo con el objetivo específico número tres, es posible implementar alternativas para complementar al convenio MARPOL en favor de reducir las emisiones no sólo de SO_x sino que también reducir las emisiones de NO_x y MP. Según el informe medioambiental sobre el transporte marítimo europeo (European Environment Agency, 2021) se espera una tendencia al alza en la emisión de óxidos nitrosos de origen marítimo en los próximos años, lo que marca la urgencia de implementar sistemas que reviertan o al menos ralenticen las emisiones de este tipo de gases.

Es en este mismo informe medioambiental se indica que a lo largo de la Unión Europea existían al año 2020 un total de 59 puertos con instalaciones de GNL, dando fuerza a la opción de considerar la migración a GNL para la propulsión de buques. Aquellos motores complementados con un SCR cuentan con una resolución específica (MEPC.198(62)) con el fin de cumplir las disposiciones del MARPOL, por ende, es una gran opción para mitigar esta emisión.

Además, es importante considerar que Chile es un país que se encuentra casi al otro lado del mundo respecto a sus mayores puertos de exportación, lo que significa que los buques que salen de este país recorren largas distancias, consumen grandes cantidades de combustible y emiten una cantidad considerable de gases de combustión.

9. Conclusión

A lo largo de esta investigación se pudieron abordar tres objetivos específicos con el fin de evaluar la emisión de los gases de escape de las embarcaciones marítimas de acuerdo con el criterio MARPOL.

A partir de la recopilación de las principales normas para emisiones del transporte marítimo encontradas en diferentes países, junto con algunas regulaciones chilenas sobre la emisión de compuestos específicos, además de una identificación más exhaustiva de los criterios que propone el convenio MARPOL en su anexo VI se pudo identificar que existen países más restrictivos respecto a emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno, así como material particulado y otros contaminantes, esto puede deberse a la conciencia que tienen estos países ante el impacto que está generando en su población la actividad marítima.

La evaluación de la reducción de emisiones que interpone el convenio MARPOL se ha llevado a cabo por medio del análisis de datos procedentes de registros de la Armada de Chile, estos datos fueron filtrados y trabajados al punto de conseguir un caso de estudio, correspondiente al buque portacontenedores Condor, a partir del cual se pudo extraer información como millas náuticas recorridas y combustible consumido a lo largo de un año de acuerdo con el tipo de motor instalado en esta unidad. Con esta información y sumado a especificaciones técnicas correspondientes al motor se pudo llegar a una estimación de emisiones de SO_2 de 113,3 [mg/Nm³] en el caso de la utilización de un combustible con 0,5% en masa de azufre, en contraste con la emisión de 793,4 [mg/Nm³] de SO_2 con combustible al 3,5% en peso de azufre. Para este tipo de gas es posible decir que el convenio MARPOL conlleva a una disminución del dióxido de azufre. Por otra parte, no tiene mayor implicancia en la generación de óxidos nitrosos ni material particulado.

Debido a los resultados obtenidos a partir del caso de estudio analizado se pudo desprender la baja efectividad del convenio MARPOL ante los óxidos nitrosos, por lo que se llevó a cabo una revisión bibliográfica de aplicaciones y técnicas que pudiesen reducir gases diferentes al SO_x y ser utilizados como un complemento a las medidas adoptadas por el convenio. Aquí se pudo destacar la utilización de sistemas como la reducción catalítica o la recirculación de gases que son conocidas en el mundo automotriz y que son efectivas de utilizar en el contexto marítimo, además se plasmas diferentes opciones que tienen potencial a futuro para complementar como la migración a sistemas de propulsión basados GNL o hidrógeno verde, compuesto que hoy en día tiene mucha popularidad debido a sus amplios beneficios ambientales. Es importante seguir investigando y ahondando en este tipo de tecnologías que quizás hoy se ven lejanas, ya que de esto depende que el mundo avance hacia la descarbonización y la disminución del uso de combustibles fósiles, los que son un recurso cada natural cada vez más escaso.

Estos resultados en conjunto demuestran que el criterio MARPOL puede ayudar a reducir la emisión de ciertos gases de combustión, sin embargo, esta medida no es suficiente para mitigarlos completamente puesto que, aplicando el criterio, un buque como el portacontenedores Condor

quedaría imposibilitado de navegar aguas estadounidenses o españolas. Es por lo que la implementación de medidas complementarias es tan necesaria, una acción temprana y ambiciosa es más barata.

Si se considera la disminución que registró la European Environment Agency respecto a las emisiones de contaminantes atmosféricos desde el año 2008 al 2017 es posible pensar que la implementación del anexo VI del convenio en conjunto con la declaración de zonas ECA y la adopción de normativas paralelas dio frutos. Algo parecido se puede ver si se analizan los datos en la EMRP de Quintero, una de las comunas con mayor actividad portuaria en la región de Valparaíso, donde se aprecia una disminución a lo largo de los años en la concentración de SO₂ en el aire, fenómeno esperado al considerar que el límite del contenido de azufre en el combustible de las embarcaciones marítimas se ha puesto más estricto con el pasar del tiempo. Sin embargo, no podemos decir lo mismo con los óxidos nitrosos, los cuales en la estación “Centro Quintero” han mantenido un promedio estable desde el año 2017 a la fecha. Esto refleja los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo, donde se estableció que el convenio disminuye la emisión de óxidos de azufre mas no necesariamente la de óxidos nitrosos, dejando en evidencia la debilidad que muestra MARPOL ante este tipo de contaminante, al cual se le debe poner atención debido a su impacto ambiental y, por ende, seguir fortaleciendo, complementando e implementando medidas que permitan su reducción en el ambiente. No obstante, la disminución de la concentración de este tipo de gases también puede haber disminuido debido al Plan de Prevención y descontaminación de la comuna de Quintero donde estos contaminantes están considerados, reforzando la idea de que la adopción de nuevas normas complementarias contribuye a la minimización de impactos ambientales por esta causa.

Disminuir la emisión de gases como los NO_x que son precursores de otros compuestos como los nitratos, mitiga los impactos que pueden tener en los ecosistemas marinos como la eutrofización de las aguas, que trae efectos negativos para la fauna y flora acuática. Así mismo, la disminución del SO_x en el ambiente debiese mitigar la incidencia de lluvias ácidas que también afectan al ecosistema acuático, así como también el suelo y la calidad de vida de las personas. Por otro lado, la presencia de estos compuestos en el aire afecta significativamente a la salud de las personas, ya sea por las partículas que entran al sistema respiratorio de cada individuo o por la formación de compuestos más nocivos para la salud como el ozono troposférico o el smog. La reducción de estos gases implica diversos efectos favorecedores en el medio ambiente, además de propiciar un equilibrio entre el desarrollo de la economía por medio de la industria naviera, la salud del medio ambiente y la salud de la población. Es por esta razón que adoptar acciones concretas como el convenio MARPOL, el Real Decreto 1042/2017, las normativas Tier y medidas complementarias para la reducción de emisiones es tan importante.

Este trabajo pretende ser un aporte para que a futuro se desarrollen y profundicen aquellas tecnologías aquí planteadas. Para que las autoridades competentes tomen en consideración los rezagos que tiene el convenio MARPOL y las tecnologías actuales, y se puedan redoblar los esfuerzos para conseguir emisiones neutras en el transporte marítimo chileno con celeridad. Por otro lado, es

importante que se continúe investigando sobre las emisiones de esta actividad y su relación con la salud y calidad de vida de las personas en las zonas costeras y portuarias, considerando que Chile es un país con costa en toda su extensión y que hasta el momento no se tiene certeza de la magnitud del impacto que el transporte marítimo tiene en la población.

10. Bibliografía

Armada de Chile. (2023). Boletín estadístico marítimo 2022. Dirección de territorio marítimo y marina mercante.

Armada de Chile (2023). Boletín estadístico portuario 2022. Dirección de territorio marítimo y marina mercante.

Baraona, G. Velasteguí, L. (2019). Materiales compuestos de matriz aleación de aluminio-silicio como alternativa en la fabricación de motores de combustión interna para la reducción de combustible. Ciencia digital.

Bonet, N. (2020). Análisis medioambiental del proceso de limpieza de los gases de escape en buques mercantes. Trabajo de final de grado para optar al grado en Tecnologías Marinas. Universidad Politécnica de Cataluña.

Carrere, M. (2023). Acuerdos para reducir las emisiones del transporte marítimo son considerados “débiles” por organizaciones ambientales. Mongabay.

Diario oficial de la Unión Europea. (2012). Directiva 2012/33/UE del Parlamento Europeo y del Consejo. Directivas.

Environmental Protection Agency. (1999). Óxidos de nitrógeno (NO_x), ¿Por qué y cómo se controlan?. Boletín técnico. Clean air technology center.

European Environment Agency. (2021). Hechos y cifras: Informe medioambiental sobre el transporte marítimo europeo.

García, R. (2001). Combustión y combustibles. Teoría de la combustión.

García Sabater, José P. (2020). Introducción al transporte de mercancías. Nota técnica.

Lupano, J. A. (2023). Desafíos ambientales y regulatorios del transporte marítimo en América del Sur. Documentos de proyectos. (LC/TS.2023/100), Santiago, Comisión Económica para América Latina y El Caribe (CEPAL).

Ministerio de trabajo y Economía social. (2023). Emisiones de motores diésel. Documentación toxicológica para el establecimiento del límite de exposición profesional de las emisiones de motores diésel.

Mundo marítimo. (2020). ¿Cuál es la real huella de carbono del transporte marítimo? “Industria marítima: Adaptación y mitigación ante el cambio climático”.

Núñez, M. (2018). Estudio de la reducción de óxidos de azufre en gases de escape. Para acceder al título de máster universitario en Ingeniería Marina. Universidad de Cantabria.

Observatorio de los servicios portuarios. (2020). Estudio de las necesidades e implicaciones de la determinación del suministro de combustible a buques como servicio portuario conforme a lo establecido en el reglamento UE 2017/352. Shipping business consultants.

Organización Marítima Internacional. (1973). Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques. MARPOL.

Pérez, A. Montero, G. Ayala, R. Coronado, M. Campbell, H. (2013). Simulación en Aspen de la combustión de mezclas diésel-biodiésel. Instituto de ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California.

Pino, A. (2017). Estimación de emisiones contaminantes atmosféricas producidas por embarcaciones marítimas en Chile. Memoria de titulación para optar al título de ingeniero civil mecánico, mención energía. Universidad técnica Federico Santa María.

Tecam. (2024). Scrubbers Tecam. Lavadores de gases para emisiones a la atmósfera.

Torres, R. (2022). Emisiones de Dióxido de Azufre (SO₂). Normas internacionales. Biblioteca del congreso nacional.

United States Environmental Protection Agency. (1996). AP 42. Chapter 3: Stationary internal combustion sources.

United States Environmental Protection Agency, (2005). Usando Plasma No Térmico Para Controlar Contaminantes Del Aire.

11. Anexos

11.1 Respuesta a solicitud OIRS

SOLICITUD N° 3647.

SEÑORA
CATALINA GONZÁLEZ CONTRERAS
PRESENTE

Junto con saludar y en relación a su solicitud N° 3647, adjunto remito a Ud., archivo "REGISTRO", el cual contiene datos de naves mercantes entre los años 2022 y 2023, en formato Excel.

Saluda atentamente a Ud.,

PAC R.G.U. Gdo. 5 (C.N. LT.) Osvaldo Castro Escobar
Encargado División Acceso a la Información Pública
Oficina Control de Gestión
Directemar

Atentamente,

11.2 Tabla caso de estudio

NOMBRE NAVI	CLASE	SEÑAL LLAMADA	PUERTO	PUERTO ORIGEN	NROmi	fh_inicio	fh_fin	Cantidad millas náuticas
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	LIRQUEN	SAN ANTONIO	9191632	04-01-2022 4:00	04-01-2022 4:30	203,8
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	SAN ANTONIO	PUNTA ARENAS	9191632	07-01-2022 10:20	07-01-2022 10:40	1414
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	PUNTA ARENAS	CHACABUCO	9191632	15-01-2022 11:30	15-01-2022 11:31	749,3
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	CHACABUCO	LIRQUEN	9191632	18-01-2022 10:20	18-01-2022 10:50	628,1
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	LIRQUEN	SAN ANTONIO	9191632	21-01-2022 1:30	21-01-2022 1:55	203,5
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	SAN ANTONIO	PUNTA ARENAS	9191632	23-01-2022 10:40	23-01-2022 10:45	1414
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	PUNTA ARENAS	CHACABUCO	9191632	31-01-2022 9:30	31-01-2022 9:50	749,3
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	CHACABUCO	LIRQUEN	9191632	03-02-2022 17:50	03-02-2022 18:00	628,1
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	LIRQUEN	SAN ANTONIO	9191632	07-02-2022 22:05	07-02-2022 22:20	203,5
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	SAN ANTONIO	PUNTA ARENAS	9191632	12-02-2022 15:15	12-02-2022 15:55	1414
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	PUNTA ARENAS	LIRQUEN	9191632	21-02-2022 9:00	21-02-2022 9:10	1215
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	LIRQUEN	SAN ANTONIO	9191632	02-03-2022 17:30	02-03-2022 18:00	203,5
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	SAN ANTONIO	PUNTA ARENAS	9191632	05-03-2022 17:10	05-03-2022 17:30	1414
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	PUNTA ARENAS	CHACABUCO	9191632	17-03-2022 10:00	17-03-2022 10:41	749,3
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	CHACABUCO	LIRQUEN	9191632	21-03-2022 10:00	21-03-2022 10:20	628,1
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	LIRQUEN	SAN ANTONIO	9191632	24-03-2022 22:10	24-03-2022 22:12	203,5
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	SAN ANTONIO	PUNTA ARENAS	9191632	27-03-2022 15:50	27-03-2022 16:00	1414
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	PUNTA ARENAS	LIRQUEN	9191632	07-04-2022 16:30	07-04-2022 16:35	1215
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	LIRQUEN	SAN ANTONIO	9191632	13-04-2022 9:15	13-04-2022 9:30	203,5
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	SAN ANTONIO	PUNTA ARENAS	9191632	14-04-2022 18:00	14-04-2022 18:30	1414
CONDOR	PORTACONTENEDOR	CBCC	PUNTA ARENAS	LIRQUEN	9191632	21-04-2022 20:30	21-04-2022 20:37	1215

11.3 Volumen de aire consumido

Consumo de aire SMCR según motor			
Consumo aire	26,9 kg		
	s		
Volumen del aire en condiciones normales de P y T según norma chilena			
T=	25 °C =	298,15 K	
P=	1 atm		
Ctte=	0,082 atm*m3		
	kmol*K		
mol=	1 kmol		
$P*V=n*R*T$			
V=	$\frac{n*R*T}{P}$		
V=	1 kmol *	0,082 atm*m3 *	298,15 K
		kmol*K	
		1 atm	
V=	24,4483 Nm3		

Volumen de aire utilizado				PM aire =	28,96 kg
					kmol
Consumo de aire	kg	*	1	*	Vol del aire Nm3
	s		PM kg/kmol		1 kmol
0,9288674	kmol		24,4483 Nm3		
	s		kmol		
Volumen aire	22,709229 Nm3				
	s				
Volumen de aire consumido en un año					
Asumiendo que los días que se consideran navegados, el buque trabajó las 24 horas					
22,7092289	Nm3 aire	3600 s	24 horas	237 días	
	s	1 hora	1 día	1 año	
465012339	Nm3 aire				
	año				

11.4 Combustible consumido

Características				
Modelo moto	MAN B&W 7S50MC-C		Total millas n	54903,9
Potencia	11060 kW		Días navegad	237
rpm	127 rpm	a plena carga		
Consumo esp	173,6 g comb			
Velocidad me	20 nudos			
	1 nudo =	1 milla náutica		
		hora		
Consumo air	26,9 kg			
SMCR	g comb	*	1 kg	
	kWh		1000 g	
SMRC =	0,1736 kg comb			
	kWh			

Consumo de combustible por hora

Potencia	kW	*	SFC	kg comb
				kWh
11060 kW		*	0,1736 kg comb	
				kWh
1920,016 kg comb		->	consumo combustible por hora	
h				

Consumo por milla náutica

Consumo de combustible p	kg comb			
	h			
Velocidad media de navegat	milla náutica			
	h			
Consumo por milla náutica	96,0008 kg comb			
	milla náutica			

Considerando que en el año 2022 el buque	54903,9	millas náuticas, podemos calcular cuánto combustible consumió para este periodo
Consumo de combustible por milla náutica	$\frac{\text{kg comb}}{\text{milla náutica}}$	* cantidad de millas náuticas recorridas en 2022
Combustible consumido en el año 2022 =	5270818,3	kg comb
	5270,8183	ton comb
consumo de comb por segundo:		
kg comb *	1	año *
año	237	días
		1 día
		24 horas
		1 hora
		3600 s
0,2574044	kg comb	
	s	

11.5 Azufre consumido y SO2 generado

Combustible consumido por segundo	0,2574044	kg comb
		s
Volumen de aire consumido por segundo	22,7092289	Nm3
		s
Volumen de aire consumido al año	465012339	Nm3
		aire
Cantidad de azufre consumida por segundo si el combustible contiene 3,5% en peso de S		
kg comb	0,035	S
s		
0,00900915	kg S	1000 g
	s	1 kg
		1000 mg
		1 g
9009,154	mg S	
	s	
Consumo de azufre mgS/:	=	396,717741 mg S
Consumo de aire Nm3/s		Nm3
		se consumen de acuerdo a la cant de combustible utilizada en 237 días de navegación

SO2 producto de la combustión (3,5% en peso de azufre)					
ecuación de reacción: S + O2 -> SO2		pm S	32 mg/mmol	pm SO2	64 mg/mmol
396,717741 mg S		1 mmol	=	12,3974294 mmol S	
Nm3		32 mg		Nm3	
Como la relación estequiométrica entre el azufre y el dióxido de azufre es 1 a 1:					
12,3974294 mmol SO2		64 mg SO2	=	793,435483 mg SO2	
Nm3		mmol		Nm3	
SO2 producido en un año					
3,6896E+11 mg SO2		1 g		1 kg	
año		1000 mg		1000 g	
				1 ton	=
				1000 kg	
					368,95729 ton SO2
					año

Cant de azufre consumido por segundo con un contenido de 0,5% en peso de S

kg comb	0,005	kg S			
s		kg comb			
0,001287022	kg S	1000	g	1000	mg
	s	1	kg	1	g
1287,022	mg S	1	s		
	s	22,7092289	Nm3		
56,67396307	mg S				
	Nm3				

SO2 producto de la combustión						
Ecuación de reacción	S + O2 -> SO2					
PM S:	32 mg/mmol					
PM SO2	64 mg/mmol					
56,67396307	mg S	1	mmol	=	1,77106135	mmol S
	Nm3	32	mg			Nm3
Dado que la relación estequiométrica del S y el SO2 es 1 a 1:						
1,771061346	mmol SO2	64	mg	=	113,347926	mg SO2
	Nm3		mmol SO2			Nm3
52708184265	mg SO2	1	g	1	kg	1 ton
	año	1000	mg	1000	g	1000 kg
				=	52,7081843	ton SO2
						año

11.6 Cálculo emisión de NOx

Calculo emisión NOx						
Factor de emisión de Nox		0,024	lb		Según AP-42 capítulo 3.4 tabla 3.4-1	
			hp*hora			
Cálculo de hp						
potencia	kW	1,34102	hp	=	14831,6812	hp
			1 kW			
NOx	=	0,024	lb	14831,681	hp	
			hp*hora			
NOx	=	355,96035	lb NOx	1 hora		
			hora	3600	seg	
NOx	=	0,0988779	lb NOx	1 seg		
			seg	22,709229	Nm3	
NOx	=	0,0043541	lb NOx	453,592	g	1000
			Nm3	1 lb		1 g
NOx	=	1974,9774	mg NOx			
			Nm3			
9,184E+11	mg Nox	1 g	1 kg	1 ton	=	918,38884
	año	1000 mg	1000 g	1000 kg		ton Nox
						año

emisión de NO2 en g/kWh para marpol						
1974,9774	mg Nox	22,709229	Nm3	3600	s	
	Nm3		s	1	hora	
161460767	mg Nox	1 g				
	hora	1000	mg			
161460,77	g Nox					
	hora					
Potencia	kW					
14,598623	g Nox					
	kWh					

11.7 Cálculo de emisión de material particulado

Cálculo emisión de material particulado							
Factor de emisión de material particulado		0,0007	lb		Según AP-42 capítulo 3.4 tabla 3.4-1		
			hp*hora				
MP	=	14831,681	hp	0,0007	lb MP		
					hp*hora		
MP	=	10,382177	lb MP	1	hora		
			hora	3600	seg		
MP	=	0,0028839	lb MP	1	seg		
			seg	22,709229	Nm3		
MP	=	0,000127	lb MP	453,592	g	1000	mg
			Nm3	1	lb	1	g
MP	=	57,603506	mg MP				
			Nm3				
2,679E+10	mg MP	1 g	1 kg	1 ton	=	26,786341	ton MP
	año	1000 mg	1000 g	1000 kg			año