



**Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura  
Carrera de Ingeniería en Marítima**

**Proyecto de trabajo de titulación  
Modalidad Proyecto de Investigación**


ALTERNATIVAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE  
COMBUSTIÓN DE MOTORES DIÉSEL MARINOS Y REDUCIR LA  
CONTAMINACIÓN DEL AIRE

**Autor:**  
ALVARADO TUAREZ ANGIE NOHELIA

**Tutor:** Ing. Folke Zambrano

Manta – Ecuador

2024 (1)

 <b>Uleam</b> UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ	<b>NOMBRE DEL DOCUMENTO:</b> <b>CERTIFICADO DE TUTOR(A).</b>	<b>CÓDIGO: PAT-04-F-004</b>
	<b>PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE GRADO</b> <b>BAJO LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>	<b>REVISIÓN: 1</b> Página 1 de 1

## CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría de la estudiante ALVARADO TUÁREZ ANGIE NOHELIA, legalmente matriculada en la carrera de Ingeniería Marítima, período académico 2024-1, cumpliendo el total de 400 horas, cuyo tema del proyecto es “ALTERNATIVAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DE MOTORES DIÉSEL MARINOS Y REDUCIR LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE”

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 29 de Julio de 2024.

Lo certifico,



Firmado electrónicamente por:  
**FOLKE ZAMBRANO VERA**

Ing. Folke Zambrano Vera  
**Docente Tutor**  
**Ingeniería, Industria y Arquitectura**

## **CERTIFICACIÓN DEL AUTOR**

Alvarado Tuárez Angie Nohelia, egresada de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura, de la carrera de Ingeniería Marítima, libre y voluntariamente declaro la responsabilidad del contenido de la presente tesis titulada “ALTERNATIVAS PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE COMBUSTION DE MOTORES DIESEL MARINOS Y REDUCIR LA CONTAMINACION DEL AIRE”.

Nos corresponde exclusivamente y la propiedad intelectual de la misma pertenece a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.



**Alvarado Tuárez Angie Nohelia**



**Ing. Folke Zambrano Vera**

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar esta tesis en primer lugar a mi familia, en especial a mis padres, por el apoyo incondicional y por ser un pilar fundamental para lograr lo anhelado, por su amor infinito y sobre todo por la confianza dada para poder lograr esta meta.

A mi pareja le agradezco, por su constante apoyo y por siempre estar conmigo en temas de estudio y demás, por darme ánimos de seguir adelante y poder culminar mi carrera.

A todas aquellas personas que han desempeñado un papel esencial en esta trayectoria hacia mi superación.

A mis abuelitos que han sido un sustento importante para mi formación y una inspiración para mi persona.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por permitirme este nuevo logro y nunca dejarme decaer ante las adversidades de la vida.

Agradezco a mis padres por siempre estar presentes a lo largo de mi camino, por ser mi inspiración y por apoyarme en todo momento ante cualquier situación. A toda mi familia por siempre estar pendiente y por brindarme su cariño sincero, de igual manera a mi pareja gracias por la motivación brindada y por todo el amor.

A los docentes de la facultad, por brindarme sus conocimientos y atender ante mis dudas, los cuales han sido de crucial importancia para mi formación académica.

A mi mentor gracias por la orientación y dedicación en este proceso, el cual no habría sido posible sin su guía.

## RESUMEN

La entidad responsable de la seguridad y el buen comportamiento medioambiental de los buques es la Organización Marítima Internacional (OMI). La OMI ha estado regulando las emisiones de SOx, NOx, PM y CO2. Los buques deben cumplir con las regulaciones establecidas por la OMI respecto de las zonas ECA, y esto sólo se podrá hacer si las entidades son capaces de encontrar soluciones para lograr los objetivos establecidos. Intentar cambiar el tipo de combustible utilizado para reducir las emisiones contaminantes sin tener que cambiar el sistema de propulsión, promover la instalación de equipos que reduzcan los contaminantes procedentes de los gases de evacuación o convertir todo el sistema de propulsión a una tecnología más “amigable” con el medio ambiente, son algunas de las opciones disponibles. Esta tesis explica y analiza cómo funcionan diversos sistemas y tecnologías que son capaces de actuar de acuerdo con la legislación definida por la OMI. Se enumeran varios ejemplos de sistemas instalados y tecnología capaz de mejorar el rendimiento de los sistemas de propulsión convencionales en términos medioambientales y también se menciona el estado del arte de los equipos y sistemas de propulsión. El estudio se realiza sobre los sistemas de propulsión más viables para su instalación en buques ecuatorianos, que al utilizar distintos combustibles tendrán distintos consumos y autonomías. Concluyendo que es el sistema Scrubber es ideal para su aplicabilidad en el país.

**Palabras clave:** *investigación sistemática, motor diésel marino, emisiones, medioambiente*

## **ABSTRACT**

The entity responsible for the safety and good environmental performance of ships is the International Maritime Organization (IMO). The IMO has been regulating SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM and CO<sub>2</sub> emissions. Ships must comply with the regulations established by the IMO regarding ECA zones, and this can only be done if the entities are able to find solutions to achieve the established objectives. Try to change the type of fuel used to reduce polluting emissions without having to change the propulsion system, promote the installation of equipment that reduces pollutants from exhaust gases or convert the entire propulsion system to a more “friendly” technology. with the environment, are some of the options available. This thesis explains and analyzes how various systems and technologies work that are capable of acting in accordance with the legislation defined by the IMO. Several examples of installed systems and technology capable of improving the performance of conventional propulsion systems in environmental terms are listed and the state of the art of propulsion equipment and systems is also mentioned. The study is carried out on the most viable propulsion systems for installation in Ecuadorian ships, which when using different fuels will have different consumption and autonomy. Concluding that the Scrubber system is ideal for its applicability in the country.

**Keywords:** *systematic research, marine diesel engine, emissions, environment.*

## ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DEL AUTOR .....	III
DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTOS .....	V
RESUMEN .....	VI
ABSTRACT .....	VII
ÍNDICE .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
OBJETIVO GENERAL .....	2
TAREAS DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1. CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. ANTECEDENTES.....	3
1.1.1. Antecedentes del Anexo V del MARPOL 73/78 .....	4
1.2. MOTORES DIÉSEL.....	6
1.2.1. Gases de escape de motores diésel .....	6
1.2.2. Óxidos de azufre (SOx).....	7
1.2.3. Producción de NOx.....	8



1.3.	MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE NO <sub>x</sub> .....	12
1.3.1.	Concepto general de reducción de NO <sub>x</sub> .....	12
1.3.2.	Métodos primarios.....	13
1.3.3.	Métodos secundarios .....	14
2.	CAPÍTULO II: ANALISIS SISTEMÁTICO PARA LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES .....	16
2.1.	ESTADO DEL ARTE .....	16
2.2.	ALTERNATIVAS DEFINIDAS A LA MÁQUINA Y AL COMBUSTIBLE .....	19
2.2.1.	Navíos de LNG .....	20
2.2.2.	Navíos a Dual-Fuel (DF) .....	22
2.2.3.	Navíos Diesel-Eléctricos .....	22
2.2.4.	Navíos de Propulsión Eléctrica .....	25
2.2.5.	Barcos con sistemas de propulsión de hidrógeno.....	28
2.3.	ALTERNATIVAS DEFINIDAS AL ESCAPE / EMISIÓN.....	32
2.3.1.	Sistema <i>Scrubber</i> .....	32
2.3.2.	Reducción selectiva no catalítica (SNCR).....	34
2.3.3.	Reducción Catalítica Selectiva (SCR).....	35
2.3.4.	Recirculación de gases de escape (EGR) .....	37
2.3.5.	Combustibles bajos en azufre.....	39
3.	CAPÍTULO III: ANALISIS COMPARATIVO Y APLICABILIDAD EN EL PAÍS	40
3.1.	BENEFICIOS Y DESAFÍOS DE CADA ALTERNATIVA .....	41

3.1.1.	Navíos LNG .....	41
3.1.2.	Navíos dual fuel .....	43
3.1.3.	Navíos Diésel-Eléctrico .....	47
3.1.4.	Navíos de propulsión eléctrica .....	52
3.1.5.	Barcos con sistemas de propulsión de hidrógeno.....	54
3.1.6.	Sistema Scrubber.....	56
3.1.7.	Reducción selectiva no catalítica (SNCR).....	59
3.1.8.	Reducción Catalítica Selectiva (SCR).....	61
3.1.9.	Exhaust Gas Recirculation (EGR).....	62
3.1.10.	Combustibles bajos en azufre .....	64
3.2.	RESUMEN DE CADA SISTEMA .....	66
3.3.	CASO ECUADOR.....	70
	CONCLUSIONES.....	72
	RECOMENDACIONES .....	74
	BIBLIOGRAFÍA .....	75

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Normas de la UE para motores diésel, categoría M con encendido por compresión.....	4
Tabla 2. Sistemas de reducción Scrubber.....	32

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emisión típica de un motor diésel de baja velocidad.....	6
Figura 2. Diseño esquemático del sistema SCR. ....	15
Figura 3. Mapa de zonas ECA actuales .....	16
Figura 4. Reglamento de la OMI sobre emisiones de NOx .....	19
Figura 5. Sistema de propulsión diésel-eléctrico típico .....	24
Figura 6. Sistema de propulsión eléctrica típico .....	25
Figura 7. Resultados del estudio de emisiones de NOx.....	27
Figura 8. Esquema de propulsión eléctrica con buses de fases separadas.....	28
Figura 9. Principio funcional de una pila de combustible.....	31
Figura 10 . Fregadora en seco con sistema de granos .....	34
Figura 11. Reducción selectiva no catalítica (SNCR).....	34
Figura 12. Esquema de un sistema SCR .....	36
Figura 13. Esquema de un sistema EGR .....	38
Figura 14. Sistema EGR en el futuro.....	39
Figura 15. Estimativa de Mercado de LNG .....	42
Figura 16. Precios del combustible en el norte de Europa (GNL como combustible de transporte en el norte de Europa   Global Maritime Hub, s.f.) .....	42
Figura 17. Emisiones específicas de NOX .....	44
Figura 18. Emisiones específicas de CO2 .....	45

Figura 19. Curvas de funcionamiento dos motores Diesel .....	48
Figura 20. Eficiencia necesaria de los Depuradores SOX.....	57
Figura 21. Relación entre contrapresión adicional y parámetros del motor.....	58

## INTRODUCCIÓN

La producción de NOx por los motores diésel se explica por el funcionamiento de un motor diésel. Un motor de gasolina funciona utilizando una mezcla de aire y combustible, que luego se enciende, mientras que un motor diésel inyecta combustible en una cámara llena de aire comprimido, que luego se quema. La mezcla aire-combustible en el motor de gasolina se quema a una temperatura más baja, mientras que la combustión instantánea del combustible en el motor diésel, que tiene una relación de compresión más alta, crea temperaturas más altas, lo que favorece la producción de NOx (Jisheng, 2018).

El tiempo de residencia del aire en la cámara de combustión también afecta a la producción de NOx, ya que al permitir que el nitrógeno reaccione durante más tiempo con el oxígeno disponible, a altas temperaturas, se produce más NOx. Un esfuerzo exitoso para reducir las emisiones de NOx de los motores diésel consistió en aumentar el número de orificios de los inyectores en la cámara de combustión, es decir, aumentar el número de inyecciones por carrera, lo que resultó en una mejor utilización del aire, un menor rango de temperatura y, por lo tanto, menos NOx producido (Kapusuz y et al., 2021).

Sin embargo, según Bouman et al., (2017) rediseñar el motor presenta muchas dificultades, la mayor de las cuales es garantizar que la cantidad de aire sea suficiente para la combustión sin provocar una mayor producción de NOx, mientras que la temperatura también debe ser lo suficientemente alta para la combustión, pero lo suficientemente baja para evitar una mayor producción de NOx.

Esta tesis se centra en el problema de las emisiones contaminantes y tiene como objetivo conocer qué sistemas existen actualmente para depurar los gases de escape en la industria y las posibles soluciones aplicables en Ecuador.

La industria naviera ha alcanzado un mayor nivel de madurez en términos de conocimiento y conciencia sobre los desafíos de la descarbonización. Se está debatiendo ampliamente sobre los combustibles verdes libres de carbono o neutralizados con carbono, como el hidrógeno, el amoníaco y el metanol verde. Sin embargo, estas solo son nuevas formas de combustible para nuevos motores y se está prestando poca atención a los medios existentes para reducir la contaminación actual de los motores diésel marinos.

## **OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN**

Investigar los últimos avances en eliminación de contaminante en los gases de escape de motores marinos, enfatizando los avances en la ingeniería en el mundo analizando la posibilidad aplicable a las embarcaciones atuneras del país.

## **OBJETIVO GENERAL**

- Analizar y estudiar la aplicación de sistemas para mejorar la eficiencia de combustión/escape de motores diésel marinos y reducir la contaminación del aire.

## **TAREAS DE LA INVESTIGACIÓN**

- **Tarea 1:** Investigar y analizar el avance actual del uso de sistemas para la reducción de emisiones de gases de escape en motores diésel marinos.
- **Tarea 2:** Realizar un análisis comparativo sobre los sistemas y medios de reducción emisiones de un motor diésel marino de 4 tiempos.
- **Tarea 3:** Monitorear los resultados y proponer los posibles métodos de reducción de los gases de escape del motor diésel.

# 1. CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

## 1.1. ANTECEDENTES

Los óxidos de nitrógeno, en este caso refiriéndose al óxido de nitrógeno (NO), el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), conocidos colectivamente como (NO<sub>x</sub>), son un grupo muy observado de contaminantes del aire y contribuyentes al calentamiento global.

Con un potencial de calentamiento global combinado comparable al del metano, se considera una cuestión crítica combatir su presencia. Un principal emisor de NO<sub>x</sub> son los vehículos que utilizan motores de combustión. Los motores diésel, en particular, se consideran una fuente principal, a pesar de que su eficiencia es superior a la de los de gasolina, debido a su funcionamiento a temperaturas y presiones (relaciones de compresión) más elevadas, lo que favorece la producción de NO<sub>x</sub> térmicos.

La Unión Europea, en un esfuerzo legal por reducir las emisiones de NO<sub>x</sub>, reduce el límite de niveles permisibles en cada etapa (Tabla 1), lo que brinda a los fabricantes un incentivo para diseñar y construir vehículos que cumplan con la norma más reciente.

Tabla 1. Normas de la UE para motores diésel, categoría M con encendido por compresión.

Límites de emisiones por contaminante en la Unión Europea (g/km)						
Tipo	Fecha	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM (ppm)
<b>Diésel</b>						
Euro I	Julio de 1992	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	-	0,14 (0,18)
Euro II	Enero de 1996	1,0	-	0,7	-	0,08
Euro III	Enero de 2000	0,64	-	0,56	0,50	0,05
Euro IV	Enero de 2005	0,50	-	0,30	0,25	0,025
Euro V	Septiembre de 2009	0,50	-	0,23	0,18	0,005
Euro VI	Septiembre de 2014	0,50	-	0,17	0,08	0,005
<b>Gasolina</b>						
Euro I	Julio de 1992	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	-	-
Euro II	Enero de 1996	2,2	-	0,5	-	-
Euro III	Enero de 2000	2,30	0,20	-	0,15	-
Euro IV	Enero de 2005	1,0	0,10	-	0,08	-
Euro V	Septiembre de 2009	1,0	0,10	-	0,06	0,005 <sup>b</sup>
Euro VI	Septiembre de 2014	1,0	0,10	-	0,06	0,005

\* Antes de Euro V turismos > 2500 kg estaban clasificados en la categoría Vehículo industrial ligero N1 - I  
 Tabla en g/km salvo PM [partículas] en partes por millón (PPM)

Fuente: (Department of Shipping and Marine Technology, 2019)

### 1.1.1. Antecedentes del Anexo V del MARPOL 73/78

Las cuestiones medioambientales han sido más actuales que nunca y la preocupación por nuestro medio ambiente global se está extendiendo a todos los sectores de la sociedad del mundo. En el pasado, el desarrollo de regulaciones internacionales para la prevención de la contaminación marina se concentró en la contaminación del agua del mar y de las regiones costeras. Recientemente, muchas agencias reguladoras y autoridades de todo el mundo contemplan la legislación de control de emisiones, centrada en reducir la contaminación del aire procedente de la industria naviera.

Hasta ahora, la industria naviera ha estado exenta de la legislación, en parte porque no había ninguna forma práctica de disponer de tecnología de control de emisiones que fuera adecuada para una instalación a bordo de un barco. Además, se han considerado las cantidades relativamente moderadas de contaminación del aire



generadas por los barcos, a escala global, en comparación con muchas otras fuentes de contaminación del aire.

Si bien la conservación del medio ambiente global ha sido un tema importante y pendiente durante bastante tiempo, el interés por el efecto ambiental de las emisiones de los barcos ha aumentado considerablemente. Asimismo, la Organización Marítima Internacional (OMI) ha reconocido la importancia de prevenir la contaminación del aire procedente de los buques. Las regulaciones de emisiones propuestas por la OMI fueron las primeras regulaciones globales sobre emisiones de gases de escape marítimos. Después de largas discusiones, estas regulaciones fueron adoptadas en la conferencia de las Partes del MARPOL 73/78 en septiembre de 1997 como Anexo VI del MARPOL 73/78 – Reglamento para la prevención de la contaminación del aire procedente de los buques.

El Anexo VI del MARPOL 73/78 aborda una amplia gama de cuestiones de control de la contaminación del aire, incluidas las reglamentaciones sobre halones, hidroclorofluorocarbonos (HCFC) y otras sustancias que agotan la capa de ozono, como los óxidos de nitrógeno (NOx), los óxidos de azufre (SOx) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), incineradores a bordo y calidad del fueloil.

Sin embargo, el Anexo VI no cubre una serie de cuestiones como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), los hidrocarburos (HC) y las partículas (PM). Recientemente, en la 44ª sesión del MEPC en diciembre de 1999, Estados Unidos presentó un documento pidiendo límites para los hidrocarburos (HC) y las partículas (PM). En cuanto al CO<sub>2</sub>, la conferencia adoptó una Resolución que invita a las organizaciones a realizar un estudio de las emisiones de CO<sub>2</sub> con el fin de establecer la cantidad y el porcentaje relativo de las emisiones de CO<sub>2</sub> de los buques, como parte del inventario global de emisiones de CO<sub>2</sub>. De hecho, al igual que los otros Anexos existentes de MARPOL,

el desarrollo del Anexo sobre contaminación del aire tendrá que continuar después de su proceso de implementación.

## 1.2. MOTORES DIÉSEL

### 1.2.1. Gases de escape de motores diésel

Las emisiones de escape de los motores diésel marinos comprenden en gran medida nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y vapor de agua, con cantidades más pequeñas de monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), hidrocarburos y material particulado. Entre los gases de escape de los motores diésel, el CO<sub>2</sub>, los SO<sub>x</sub>, los NO<sub>x</sub>, los HC y las partículas se consideran contaminantes. La composición típica de los gases de escape de un motor diésel se muestra en la Figura 1.

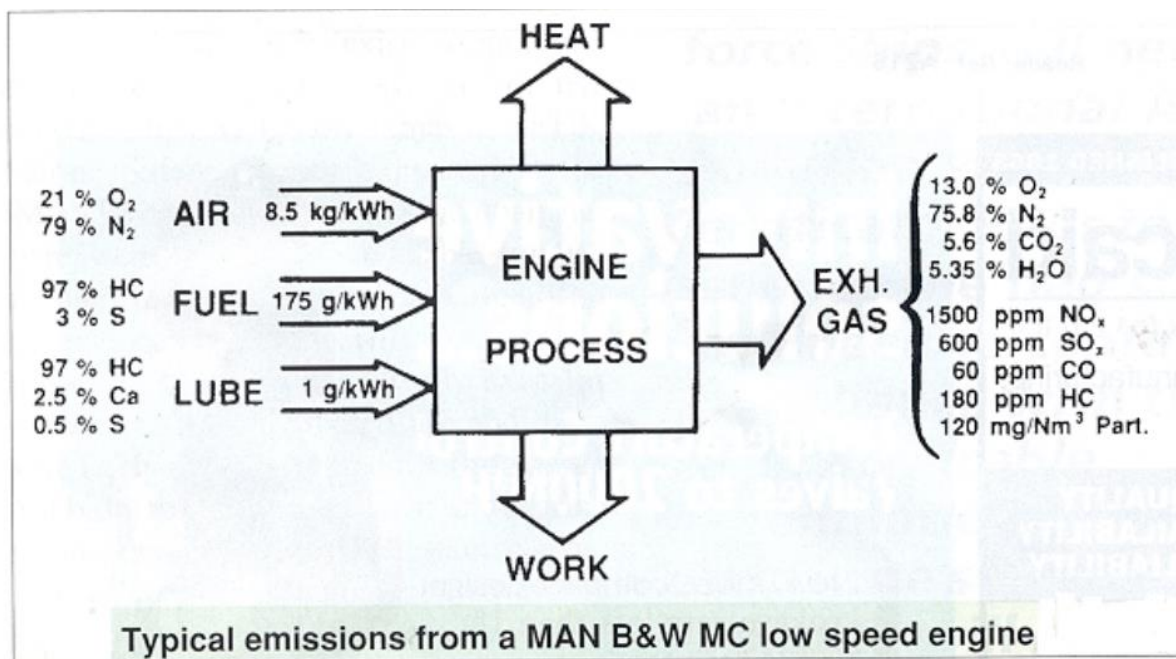


Figura 1. Emisión típica de un motor diésel de baja velocidad  
Fuente: (Bellman)

Se están preparando varias limitaciones de emisiones a nivel mundial, pero hasta ahora el enfoque principal ha sido reducir las emisiones de NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub> porque amenazan la salud humana, la vegetación y el medio ambiente. Por lo tanto, el Anexo

VI del MARPOL 73/78 regula por el momento únicamente las emisiones de NOx y SOx de los motores diésel. Sin embargo, dado que el uso de petróleo fósil en motores diésel para propulsión principal y servicios auxiliares contribuye en gran medida a la contaminación atmosférica, es probable que sea el centro de atención de nuevas leyes en el futuro. Existe un consenso cada vez mayor, especialmente en determinadas partes de Europa y Estados Unidos, en que también deben reducirse otros contaminantes procedentes de los motores diésel y otras fuentes de combustión, además de las emisiones de NOx y SOx.

### **1.2.2. Óxidos de azufre (SOx)**

La formación de SOx es proporcional al contenido de azufre en el combustible. Todo el azufre del combustible permanecerá en los gases de escape. p.ej. 1 kilogramo de azufre en el combustible se oxida a SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub> durante y después de la combustión a 2 kilogramos de SO<sub>2</sub> en los gases de escape (la proporción de SO<sub>2</sub> a SO<sub>3</sub> es aproximadamente 95:5 en los gases de escape diésel). Por lo tanto, la reducción del contenido de azufre en el combustible marino es un método viable para reducir las emisiones de SOx. (Gotmalm O.A.1992). Una forma alternativa de eliminar los SOx de los gases de escape puede realizarse lavando el gas con agua en un depurador, pero esto deja otro problema de eliminación del ácido sulfúrico en el agua, que en consecuencia debe neutralizarse químicamente.

El SOx contribuye ambientalmente a la formación de lluvia ácida. Los SOx de los gases de escape acabarán siendo eliminados de la atmósfera por la lluvia, lo que aumentará la acidez del suelo. Desde el punto de vista operativo, los SOx contribuyen directamente a la corrosión a baja temperatura del sistema de escape, la camisa del cilindro y la culata. Por lo tanto, es un compuesto indeseable y estará sujeto a una legislación cada vez mayor que limite el contenido de azufre en el petróleo.

Como se indica en la Regla 14 del Anexo IV limita el contenido de azufre en el escape de motor marino al 4,5%, y especialmente al 1,5% en las áreas de control de emisiones de SOx. El combustible con bajo contenido de azufre ya está disponible en el mercado y no existen problemas técnicos en cuanto a la prevención de la contaminación mediante el uso de combustible con bajo contenido de azufre, pero requiere mucha energía e inversiones, lo que resulta en un aumento considerable del coste del combustible.

Por lo tanto, el precio del combustóleo depende del contenido de azufre, hecho que debe ser considerado al evaluar el uso del sistema de limpieza con bajo versus alto azufre. Según algunos estudios, el consumo total de fueloil pesado y diésel marino en 1980 se estimó en 110 millones de toneladas, y el contenido de azufre se calculó en 2,91 millones de toneladas, partiendo del supuesto de que el porcentaje medio en peso de azufre en el combustible pesado era 2,82%, y en gasóleo marino 0,94%.

Es posible que se hayan emitido 2,91 millones de toneladas de azufre, lo que equivale a 5,82 millones de toneladas de SO<sub>2</sub>. Esta cifra representa el 5,3% de las emisiones globales estimadas de SO<sub>2</sub>. Sin embargo, no ha habido un acuerdo general sobre la cantidad de emisiones de SOx que emanan de los barcos. Esta cuestión se ha abordado en varias comunicaciones a las distintas reuniones de la OMI. Los cálculos varían entre alrededor de 6 millones de toneladas cada año, o alrededor del 5% de las emisiones globales totales. Otros estudios recientes han indicado que las emisiones de SOx de los barcos representan aproximadamente el 8% de las emisiones de SOx a nivel mundial.

### **1.2.3. Producción de NOx**

#### ***Descripción general del problema de NOx***

Según Nevers N.D. (2022), aunque el nitrógeno forma ocho óxidos diferentes, nuestro principal interés en la contaminación del aire está en los dos óxidos más comunes: el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). Además, estamos empezando a preocuparnos por el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). El aire ordinario contiene casi un 80% de nitrógeno (N<sub>2</sub>) y parte de este nitrógeno se oxida a NO<sub>x</sub> (NO, NO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O) durante el proceso de combustión.

El NO es un gas incoloro que tiene algunos efectos nocivos para la salud, pero estos efectos son sustancialmente menores que los de una cantidad equivalente de NO<sub>2</sub>. En la atmósfera y en los dispositivos industriales, el NO reacciona con el O<sub>2</sub> para formar NO<sub>2</sub>, un gas de color marrón que irrita gravemente las vías respiratorias. El NO y el NO<sub>2</sub> a menudo se tratan juntos como un problema o como una especie casi, y se escriben NO<sub>x</sub>. La mayoría de las regulaciones para las emisiones de NO<sub>x</sub> basan todos los valores numéricos en el supuesto de que todo el NO se convierte en NO<sub>2</sub>. La conversión de NO en NO<sub>2</sub> continuará en la atmósfera. El NO<sub>2</sub> será eliminado por la lluvia y eventualmente aumentará la acidez del suelo por la lluvia ácida. Los NO<sub>x</sub> se liberan a la atmósfera principalmente a través de grandes fuentes de combustión, como las centrales eléctricas alimentadas con combustibles fósiles y los motores diésel alimentados con petróleo.

El NO<sub>x</sub> también es conocido como una de las causas del agotamiento de la capa de ozono, que tiene efectos adversos para la salud además de las lluvias ácidas. Según el informe presentado por Estados Unidos en la 44<sup>a</sup> sesión del MEPC, las emisiones de NO<sub>x</sub> de los motores diésel marinos son motivo de preocupación para la comunidad internacional debido a su contribución al ozono a nivel del suelo. El ozono troposférico se forma cuando los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno reaccionan en presencia de la luz solar. En las últimas décadas, muchos investigadores han

investigado los efectos sobre la salud asociados con la exposición aguda al ozono, tanto a corto plazo como prolongada.

Los valores de emisión de diversos componentes de la contaminación del aire procedentes de motores diésel marinos están influenciados por la calidad del fueloil y el estado del motor, y es difícil definir factores de emisión representativos. Un informe presentado por Noruega en el MEPC concluyó que el transporte marítimo internacional contribuye con aproximadamente el 7 % de la descarga total mundial de NOx. Mientras que, según el documento presentado por los Estados Unidos en la 44ª sesión del MEPC (1999), algunos estudios estiman la contribución total de los motores diésel marinos a las existencias de NOx en un 4 % o más. Un estudio reciente de Corbett y Fischbeck (2023) estima que estos motores pueden contribuir anualmente hasta el 14% de las emisiones mundiales de nitrógeno procedentes de combustibles fósiles.

La producción de NOx por los se explica por el funcionamiento de un motor diésel. Un motor de gasolina funciona utilizando una mezcla de aire y combustible, que luego se enciende, mientras que un motor diésel inyecta combustible en una cámara llena de aire comprimido, que luego se quema.

La mezcla aire-combustible en el motor de gasolina se quema a una temperatura más baja, mientras que la combustión instantánea del combustible en el motor diésel, que tiene una mayor relación de compresión, crea temperaturas más altas, lo que favorece la producción de NOx. El tiempo de residencia del aire en la cámara de combustión también afecta a la producción de NOx, ya que permitir que el nitrógeno reaccione con el oxígeno disponible durante más tiempo, a altas temperaturas, produce más NOx.

Un esfuerzo exitoso para reducir las emisiones de NOx de los motores diésel consistió en aumentar el número de orificios de los inyectores en la cámara de combustión, es decir, aumentar el número de inyecciones por carrera, lo que se tradujo en un mejor aprovechamiento del aire, un menor rango de temperatura y, por tanto, menos NOx producido.

Sin embargo, rediseñar el motor presenta muchas dificultades, la mayor de las cuales es garantizar que la cantidad de aire sea suficiente para la combustión sin provocar una mayor producción de NOx, mientras que la temperatura también debe ser lo suficientemente alta para la combustión, pero lo suficientemente baja para evitar un aumento térmico.

Otros esfuerzos, que implican el postratamiento de las emisiones, incluyen la Reducción Catalítica Selectiva (SCR). El sistema implica la inyección de una solución de urea, que se degrada a amoníaco y dióxido de carbono, o una solución acuosa de amoníaco al 25%. El amoníaco reacciona con el NOx para producir gas nitrógeno y vapor de agua. Sin embargo, la urea es irritante y puede dañar la salud de quienes intervienen en su uso y transporte, mientras que el amoníaco es tóxico. Esto representa una desventaja importante de SCR y SNCR (Reducción Selectiva No Catalítica).

Otra desventaja del SCR es que la actividad catalítica sólo está presente a temperaturas de 140 °C y superiores, lo que limita su capacidad para reducir las emisiones creadas durante el arranque en frío de un motor, ya que es necesario calentarlo. Estas dificultades despertaron el interés por la capacidad fotocatalítica del dióxido de titanio, que no requiere la adición de otros químicos y presenta su actividad a temperatura ambiente. Dos patentes, presentadas por Volkswagen AG, Wolfsburg, Alemania y Battelle Memorial Institute Inc., Columbus, Ohio, EE. UU.

respectivamente, confirman y validan mediante el uso de sus propios resultados experimentales que el dióxido de titanio se puede utilizar de esta manera para la Reducción de emisiones, especialmente para motores diésel y Otto.

El dióxido de titanio también se ha utilizado con éxito para reducir las concentraciones de hidrocarburos no quemados y monóxido de carbono, que alcanzan su punto máximo durante los arranques en frío. Un estudio a mayor escala realizado, en el que se recubrió una zona artificialmente cerrada de un aparcamiento cubierto con pintura que contenía dióxido de titanio y se llenó con gases de escape de automóviles, demostró que las concentraciones de NO y NO<sub>2</sub> se redujeron en un 19% y un 20% respectivamente después de un período activado por UV de 5 h.

### **1.3. MÉTODOS DE REDUCCIÓN DE NO<sub>x</sub>**

#### **1.3.1. Concepto general de reducción de NO<sub>x</sub>**

Hasta ahora, el motor diésel se ha desarrollado bajo las dos tecnologías principales de eficiencia térmica y confiabilidad. En la actualidad, el desarrollo de motores diésel también se enfrenta a otro tema importante: el problema medioambiental, y la mayoría de los esfuerzos tecnológicos se concentran ahora en este asunto. Los fabricantes de motores deben mirar en esta dirección y deben esforzarse por resolver los problemas medioambientales que se desarrollaron anteriormente, combinados con un buen rendimiento del motor y una alta fiabilidad.

En cuanto a los motores diésel marinos, desde y mucho antes de la legislación del Anexo VI de MARPOL, toda la preocupación se centra en la reducción de las emisiones de NO<sub>x</sub>. Los métodos prácticos para la reducción de NO<sub>x</sub> se pueden dividir en métodos primarios y métodos secundarios. Se sabe que no hay diferencia entre motores de velocidad lenta, media y alta porque todos tienen ciclo diésel con



compresión de aire y proceso de combustión en condiciones de alta temperatura y alta presión.

### **1.3.2. Métodos primarios**

Los métodos primarios tienen como objetivo reducir la cantidad de NOx formado durante la combustión. El objetivo básico de la mayoría de estas medidas es reducir la temperatura máxima en el cilindro, ya que esto da como resultado inherentemente una menor emisión de NOx. El sistema de combustión de bajo NOx se basa en una combinación de relación de compresión, sincronización de inyección y tasa de inyección. Por lo tanto, al considerar el método de reducción de NOx se debe tener en cuenta que todos los diferentes métodos de reducción de NOx pueden afectarse entre sí.

Los métodos primarios se pueden clasificar de la siguiente manera:

#### ***Inyección de combustible alterada***

- Modificación de la boquilla de combustible
- Inyección de combustible retardada
- Inyección de combustible a alta presión
- Adición de agua
- Inyección directa de agua
- Agua combustible emulsionada
- Inyección de agua estratificada
- Humidificación del aire de admisión

#### ***Tratamiento del aire de combustión***

- Recirculación de gases de escape
- Ajuste de la válvula de admisión/escape
- Cambio de proceso del motor

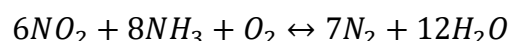
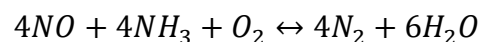
- Relación de compresión

### 1.3.3. Métodos secundarios

Métodos secundarios, destinados a eliminar los NOx de los gases de escape mediante un tratamiento posterior. La reducción catalítica selectiva (SCR) es el método más conocido del llamado postratamiento de gases de escape.

#### ***Reducción Catalítica Selectiva***

La reducción catalítica selectiva (SCR) es el método de postratamiento de gases de escape más conocido hasta el momento. Normalmente, se pueden alcanzar niveles de reducción de NOx muy altos, es decir, del 90 al 95 %. Por lo tanto, puede aplicarse si se regula una reducción más estricta de NOx. La reducción de los óxidos de nitrógeno se realiza inyectando amoníaco o urea en los gases de escape a una temperatura de 320-420 °C. Cuando la mezcla de amoníaco y gases de escape pasa a través de un catalizador, los óxidos de nitrógeno, que consisten principalmente en NO y NO2, se convierten según los siguientes esquemas de reacción:



Como puede verse en los esquemas anteriores, este método no implica ningún problema de eliminación porque la conversión de los óxidos de nitrógeno no crea ninguna contaminación secundaria, ya que los productos formados son sólo nitrógeno y vapor de agua.

El grado de eliminación de NOx depende de la cantidad de amoníaco o urea añadida (expresada por la relación NH3/NOx). Con una relación NH3/NOx alta, se puede obtener un alto grado de eliminación de NOx, pero al mismo tiempo aumentará la cantidad de amoníaco no utilizado (llamado deslizamiento de NH3) en los gases de combustión limpios. Es deseable que la concentración de amoníaco no utilizado en el

gas limpio sea lo más baja posible, debido al enfriamiento de los gases de combustión en la caldera o intercambiador de calor aguas abajo, el amoníaco puede reaccionar con el SO<sub>3</sub> en los gases de escape y provocar contaminación de la superficie de calentamiento por sulfatos de amonio.

Para resolver el problema mencionado anteriormente, MAN B&W introdujo la siguiente técnica: la cantidad de NH<sub>3</sub> inyectada en el conducto de gases de escape se controla mediante una computadora de proceso, dosificando el NH<sub>3</sub> en proporción a los NO<sub>x</sub> producidos por el motor en función de su carga. Esta relación se mide durante las pruebas en el banco de pruebas de motores. La relación obtenida se programa en la computadora de proceso y se utiliza para el control anticipado de la dosificación de NH<sub>3</sub>. Posteriormente, un sistema de retroalimentación ajusta la dosificación de amoníaco en función de la señal de salida de NO<sub>x</sub> medida. En la Figura 2 se muestra un diseño esquemático del diseño del sistema.

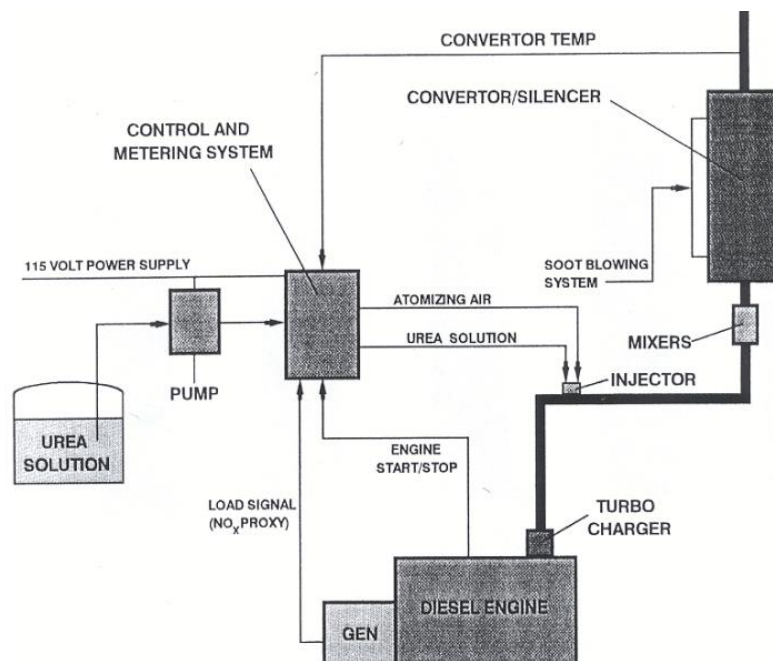


Figura 2. Diseño esquemático del sistema SCR.  
Fuente: (Feng y otros, 2022)

## 2. CAPÍTULO II: ANALISIS SISTEMÁTICO PARA LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES

### 2.1. ESTADO DEL ARTE

La normativa establecida por el convenio MARPOL referente al Anexo VI entró en vigor el 19 de mayo de 2005, con el objetivo de reducir las emisiones globales de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y material particulado (PM) procedentes de los motores marinos. Por lo tanto, era necesaria una respuesta de algunos países costeros para reducir las emisiones de SO<sub>x</sub> de los buques en sus áreas de jurisdicción, en las que se establecieron las Áreas de Control de Emisiones de Azufre (SECA) descritas en el Anexo VI. LAS SEQUÍAS abarcan el área del Mar Báltico, el área del Mar del Norte, la región de América del Norte (incluido el sector costero de Estados Unidos y Canadá) y las áreas del Mar Caribe (alrededor de Puerto Rico y las Islas Vírgenes de Estados Unidos) (Muhammad y Fadilah, 2023).

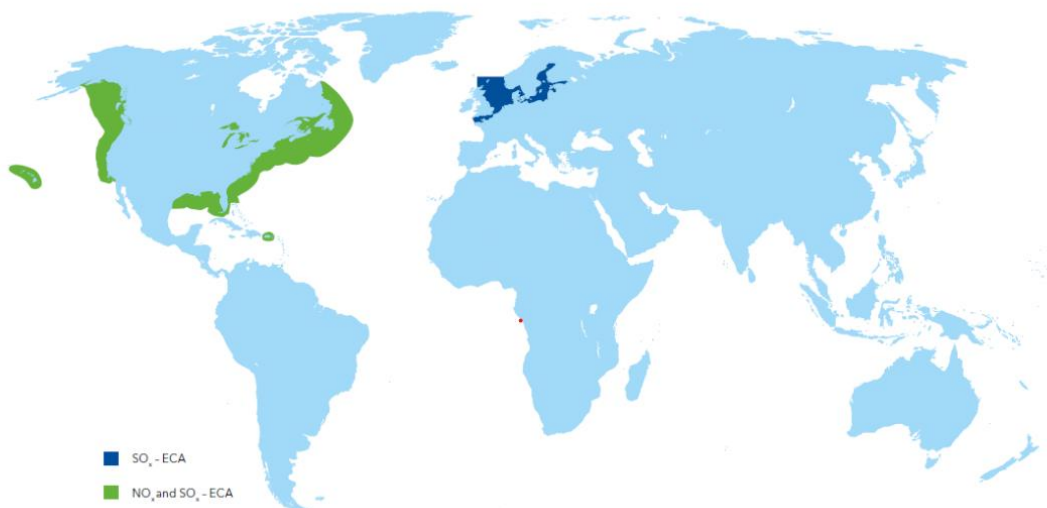


Figura 3. Mapa de zonas ECA actuales  
Fuente: (DNV-GL, 2018)

Para controlar las emisiones de SO<sub>x</sub> y PM es necesario reducir el contenido de azufre en los combustibles, ya que aumenta significativamente las emisiones. Las emisiones de SO<sub>x</sub> de los motores diésel marinos forman aerosoles de sulfato o

partículas que contienen azufre, que constituyen el componente principal de las partículas. Además, las emisiones de SO<sub>x</sub> también son capaces de condensarse para formar partículas de tamaño pequeño que pueden unirse a partículas más grandes, lo que da como resultado el crecimiento de compuestos de partículas (Bakker et al., 2016).

Estas partículas contribuyen de manera importante a la contaminación del aire y también desempeñan un papel en la formación de aerosoles marinos. Por lo tanto, la OMI no limita particularmente las emisiones de PM directamente, pero controla la parte que relaciona la formación de PM a partir de la liberación de azufre. Lo hace mediante los requisitos sobre el contenido de azufre del combustible establecidos en la regla 14 del anexo VI. El valor máximo del contenido de azufre de los combustibles marítimos utilizados para los buques que operan en SECA se redujo del 1% al 0,1% el 1 de enero de 2015.

Como alternativa al uso de combustibles con bajo contenido de azufre, existen sistemas aprobados para reducir las emisiones, como los depuradores de SO<sub>x</sub>, que podrían utilizarse de forma predominante. En el caso de este tipo de sistemas de reducción de emisiones, se requiere la aprobación de los respectivos estados del pabellón del barco. Los depuradores desempeñan el papel de filtros de gases de escape de los motores para eliminar los SO<sub>x</sub>, utilizando como medio de lavado el agua, que será vertida directamente al océano. Esta agua puede tratarse con productos químicos y reutilizarse durante un tiempo antes de ser vertida o tratada mediante una combinación de las técnicas antes mencionadas (Ballou et al., 2019). Un análisis de la rentabilidad de tres opciones de reducción (montar depuradores en barcos que utilizan HFO (combustible pesado), LSHFO (combustible pesado con bajo contenido de azufre y diésel) encontró que el uso combinado de HFO con la

instalación de depuradores proporciona un costo más bajo. Sin embargo, esta opción beneficia a los buques que operan a altas velocidades, lo que aumentará el consumo de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, la reducción de SO<sub>x</sub> mediante el uso de depuradores puede resultar en un aumento de CO<sub>2</sub> (Chu Van et al., 2019).

La regla 13 del Anexo VI del Convenio MARPOL ayuda a controlar las emisiones de NO<sub>x</sub> de los motores diésel marinos con una potencia superior a 130 kW. Los diferentes niveles de exigencia establecidos dependen de la fecha de construcción del buque y de la velocidad del motor. Cabe señalar que los requisitos de Nivel III solo se aplican a embarcaciones nuevas que operan en Áreas de Control de Emisiones de Óxido de Nitrógeno (NECA) establecidas para limitar las emisiones de NO<sub>x</sub>, particularmente en las regiones de América del Norte y el Mar Caribe. Se sabe que las emisiones de NO<sub>x</sub> derivan de varios parámetros del motor, como la temperatura de combustión, el tiempo involucrado en el proceso de combustión, la presencia de oxígeno y el retraso en el encendido (Chien, 2019).

Generalmente se hace referencia a las normas de emisiones de la OMI en tres niveles. Las normas de nivel I se definieron en la versión de 1997 del anexo VI del Convenio MARPOL, mientras que las normas de nivel II y III se introdujeron mediante enmiendas al anexo VI adoptadas en 2008. El anexo VI se aplica retroactivamente a los nuevos motores de más de 130 kW instalados en buques construidos en o después del 1 de enero de 2000, o que sufran una modificación importante con posterioridad a dicha fecha. Anticipándose a la ratificación del Anexo VI, la mayoría de los fabricantes de motores marinos han estado fabricando motores que cumplen con las normas de Nivel I desde 2000. Las enmiendas al Anexo VI fueron aprobadas en octubre de 2008 y ratificadas por 53 países (Dokkum, 2016).

Las ECA establecidas garantizan que los buques cumplan con los límites de NOx del nivel III de la OMI. Los límites de Nivel I y Nivel II son estándares globales, mientras que los estándares de Nivel III se aplican solo en NECA<sup>1</sup>. Este último solo se aplicarán a todos los buques construido del 1 de enero del 2016 con motores de más de 130KW. La Figura 4 muestra los estándares de emisiones de NOx adoptados por el Anexo VI, los cuales se definen en función de la velocidad máxima de operación del motor (número de rpm).

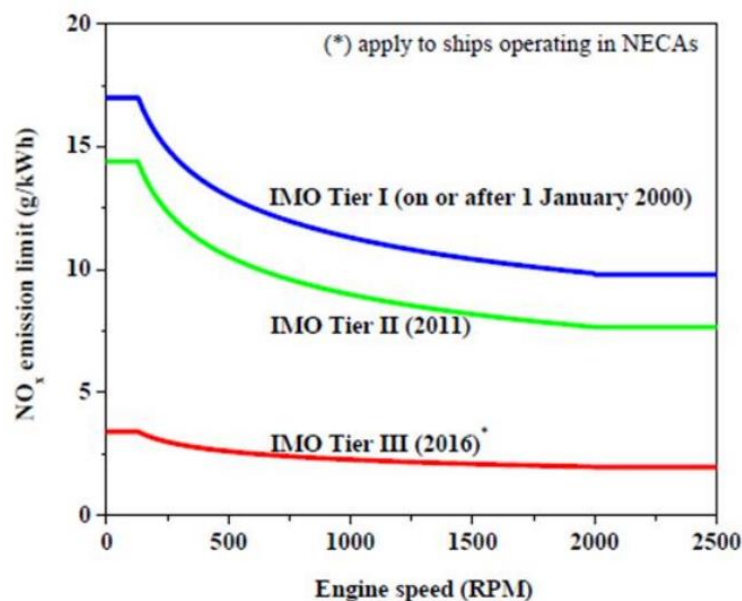


Figura 4. Reglamento de la OMI sobre emisiones de NOx  
Fuente: (Du et al., 2015)

## 2.2. ALTERNATIVAS DEFINIDAS A LA MÁQUINA Y AL COMBUSTIBLE

La normativa que establece las emisiones de los buques en el ECA cambiará en el futuro el consumo de combustible marítimo, así como también habrá un gran cambio en los dispositivos de control que operan a bordo de los buques. Teniendo esto en cuenta, esta sección presenta algunas de las estrategias más probables.

<sup>1</sup> NOx Emissions Control Area (Área de Control de Emisiones de NOx)

### 2.2.1. Navíos de LNG

A medida que la industria marítima está considerando alternativas al HFO, parte del mercado cambiará al gasóleo marino (MGO) o al GNL u otros combustibles alternativos. El transporte marítimo que se produce fuera de las zonas de ECA donde se puede utilizar HFO o combustible con bajo contenido de azufre (LSFO) dependerá de futuras regulaciones globales. Los buques que operan parcialmente en áreas ECA probablemente elegirán MGO como combustible de cumplimiento. Sin embargo, el transporte pesado en las zonas de ECA puede proporcionar incentivos suficientes para un cambio completo al GNL (DNV-GL, 2018).

Los motores que utilizan GNL pueden dañar algunos sistemas de reducción de emisiones instalados y no requieren medidas especializadas de reducción de NOx para cumplir con las emisiones de NOx del Nivel III. La posible falta de control de emisiones, junto con el costo del combustible significativamente mayor, hace que el GNL sea una opción atractiva para cumplir con reglas establecidas.

Los únicos grandes buques que actualmente utilizan GNL como combustible en viajes internacionales son los portacontenedores. Para que el GNL se convierta en el combustible utilizado en la mayoría de los barcos, se debe crear una red global de terminales de GNL. De lo contrario, los buques propulsados por GNL se limitarán a empresas costeras donde se establezcan pequeñas redes para este fin (Katsunori y Masamichi, 2020).

Los buques de GNL utilizan esencialmente gas natural (GN), que es una mezcla de hidrocarburos ligeros, cuyo componente principal es 85-96% de metano (CH<sub>4</sub>) en volumen, con proporciones más pequeñas de etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), butano. (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), pentano (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>) y nitrógeno (N<sub>2</sub>) como componente inerte.



El sistema de propulsión de los buques de GNL implica la generación y consumo de gas de ebullición<sup>2</sup> (BOG). Una forma de clasificar los sistemas de propulsión de buques de GNL es según la producción de BOG durante el proceso de transporte. Tanto los combustibles utilizados como las regulaciones de emisiones son factores que influyen en la dirección de los sistemas de propulsión de los buques de GNL.

El principal sistema de propulsión de los buques de GNL se basa, desde 1960, en turbinas, ya que este sistema permite la combustión simultánea, en calderas, del combustible pesado y del BOG generado durante el transporte. La instalación alimentará las turbinas y turbogeneradores. Desde el año 2003, los sistemas de propulsión de buques de GNL están en constante desarrollo, las turbinas están siendo reemplazadas por motores de combustión interna debido a las mejoras en la eficiencia y porque, como se mencionó anteriormente, estos también permiten la quema de combustible pesado además del BOG (DNV-GL, 2020).

Este cambio se observó en varios petroleros, que adoptaron el metano a partir de la fecha mencionada y que comenzaron a adoptar estos motores de combustión interna. Estos motores, capaces de consumir distintos tipos de combustible, son conocidos con las siglas DF, Dual Fuel. Los motores DF utilizan una pequeña cantidad de diésel, aproximadamente del 1 al 8%, para el encendido en la cámara de combustión y utilizan gas en funcionamiento normal. Este tipo de motor tiene como ciclo principal de funcionamiento el ciclo Otto. Los motores DF desarrollados alrededor del año 2003 son motores de 4 tiempos, sin embargo, debido a los avances tecnológicos, actualmente también se utilizan en motores de 2 tiempos (Mora, 2022).

---

<sup>2</sup> Gas de ebullición (BOG) durante el transporte de gas natural licuado, se transporta cerca de la temperatura de vaporización, esta vaporización conocida como ebullición debe retirarse de los tanques para mantener la presión del tanque de carga.

### **2.2.2. Navíos a Dual-Fuel (DF)**

Un motor Dual-Fuel es un motor de combustión interna generalmente adaptado para funcionar con HFO o diésel y que también puede quemar gas natural. Este tipo de motores ya se ha mencionado anteriormente en los buques GNL ya que estos dos sistemas están vinculados por su forma de convivencia técnica, por lo que sólo se hará una pequeña alusión a este tipo de sistemas. Los sistemas DF se desarrollaron a partir de modificaciones técnicas basadas en motores que utilizaban HFO, debido a diferencias evidentes entre los combustibles (Dokkum, 2016).

En los motores DF se combinan las características de presión de encendido y compresión de los motores convencionales y de GNL. El combustible gaseoso se mezcla previamente con aire comprimido, siendo el proceso similar al de los motores diésel convencionales. Sin embargo, la mezcla de combustible comprimida no arde debido al mayor retraso de encendido (IDT-Ignition Delay Time) que es característico de los combustibles de baja reactividad como el metano. De este modo, al final de la carrera de compresión se inyecta en el cilindro del motor una cantidad relativamente pequeña de combustible altamente reactivo, por ejemplo, diésel líquido. El combustible altamente reactivo se quema y libera suficiente energía para encender la mezcla de gas natural. Este mecanismo de encendido a menudo se denomina encendido piloto diésel. Normalmente, la cantidad de combustible piloto es muy pequeña, suficiente para lograr un encendido confiable (Bouman et al., 2017).

### **2.2.3. Navíos Diesel-Eléctricos**

Los sistemas Diesel-Eléctricos son un sistema de propulsión muy utilizado en entornos marítimos. En este sistema, los motores diésel producen energía a partir de un generador, que a su vez transmite esta energía a los ejes a través de un motor

eléctrico. Este tipo de sistemas se pueden utilizar en submarinos y buques de superficie.

Hay casos en los que la carga auxiliar es sólo una fracción de la carga necesaria para la propulsión, las pérdidas asociadas con la conversión eléctrica conducen a un mayor consumo de combustible en los sistemas de propulsión eléctrica. Los equipos eléctricos también conllevan un aumento de peso, tamaño y coste. Por tanto, los barcos que operan frecuentemente a bajas velocidades pueden beneficiarse de estar equipados con un sistema de propulsión híbrido. En la propulsión diésel-eléctrica, el trabajo mecánico proporciona la energía propulsora necesaria para altas velocidades y alta eficiencia (Wei y Zhou, 2017).

Además, para bajas velocidades se utiliza un motor eléctrico, acoplado al mismo eje a través de una caja reductora o directamente al eje de la hélice, evitando que el motor principal funcione de manera ineficiente a carga parcial. Este motor también se puede utilizar como generador para alimentar la red eléctrica de los barcos. En la Figura 5 se muestra un diseño típico de un sistema de propulsión híbrido.

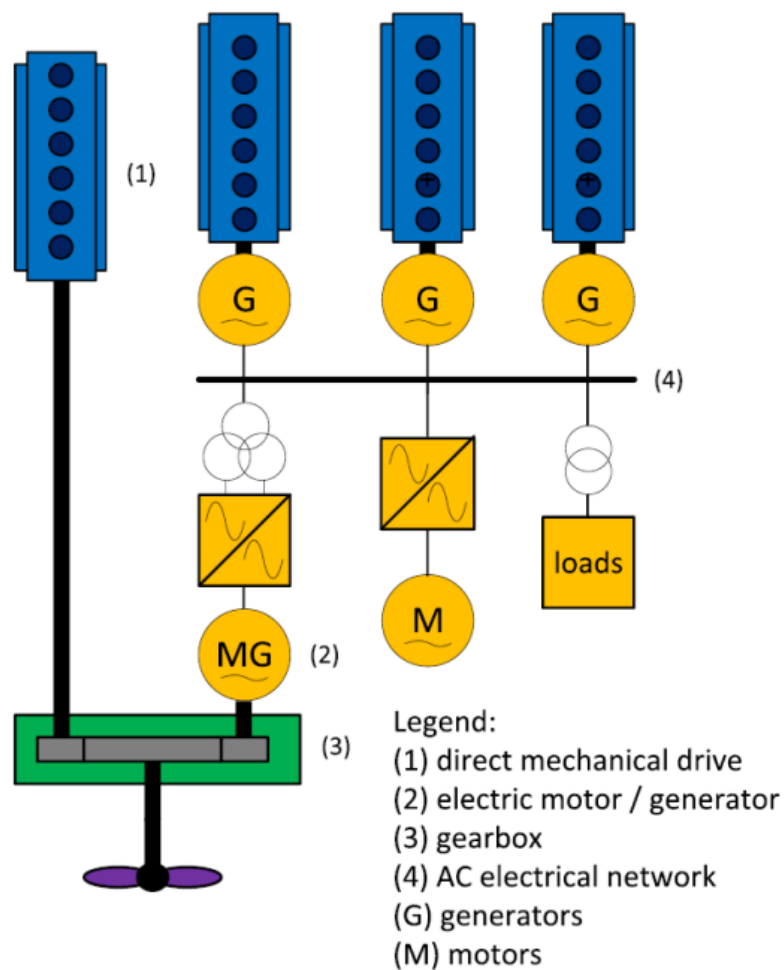


Figura 5. Sistema de propulsión diésel-eléctrico típico  
Fuente: (Du et al., 2015)

Cuando el generador o grupo de generadores está funcionando produce energía eléctrica necesaria para la locomoción del barco. Normalmente, el control se basa en reglas o el operador determina la capacidad de generación. Las aplicaciones típicas de los sistemas de propulsión híbridos se encuentran en fragatas y destructores, remolcadores y buques de alta mar. En la Marina de los Estados Unidos concluyeron que este tipo de sistema tenía muchos beneficios y se aplicó a barcos de la clase de barcos DDG-5.

## 2.2.4. Navíos de Propulsión Eléctrica

La propulsión eléctrica existe desde principios del siglo XX. En la década de 1990, la propulsión eléctrica recibió un gran impulso en la industria de los cruceros y los buques capitales<sup>3</sup>. En la Figura 6 se muestra una arquitectura típica de un sistema de propulsión eléctrica. Múltiples grupos electrógenos diésel. (1), una red eléctrica de alta tensión de frecuencia fija (2). Esta red alimenta al motor eléctrico de propulsión (5) y a las cargas auxiliares (6), en la mayoría de los casos a través de un transformador (3). El motor de propulsión eléctrico está controlado por frecuencia (4) y se utiliza para controlar la velocidad de la línea de ejes y por tanto la velocidad del barco (Du et al., 2015).

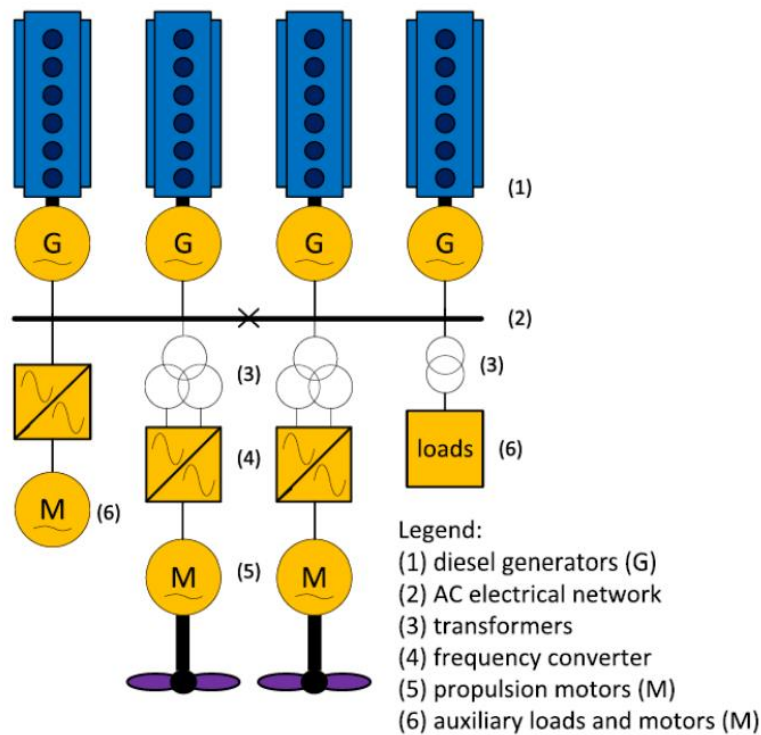


Figura 6. Sistema de propulsión eléctrica típico  
Fuente: (Du et al., 2015)

<sup>3</sup> Los Capital Ships son los barcos más importantes de una armada, generalmente son los barcos más grandes en comparación con otros buques de guerra de sus respectivas flotas.

Aunque la reducción del consumo de combustible atribuida al uso de medios eléctricos se ve compensada por el aumento de las pérdidas eléctricas, la propulsión eléctrica ha tenido mucho éxito en la industria de los cruceros. Esto se atribuye principalmente a la robustez y redundancia de los sistemas eléctricos, donde el fallo de un generador diésel casi no tiene impacto en el funcionamiento del barco. Además, la propulsión eléctrica permite flexibilidad en los espacios de máquinas, debido a la reducción de la longitud de la línea de ejes, que tradicionalmente determina la disposición tradicional de la sala de máquinas (Shang Chi, 2018).

Debido a su éxito en la industria de los cruceros, la propulsión eléctrica también se ha aplicado a otros tipos de barcos para realizar diferentes funciones. La elección de la propulsión eléctrica en estos buques viene determinada principalmente por sus diferentes perfiles operativos. Otra característica de la propulsión eléctrica, especialmente importante para los buques, es la mayor fiabilidad de las instalaciones eléctricas. Por ejemplo, tener motores redundantes en reserva garantiza que haya suficiente potencia disponible en caso de falla.

Sin embargo, el funcionamiento de motores extra provoca una carga parcial y, por tanto, una menor eficiencia de las máquinas térmicas implicadas en la generación de energía y un aumento de las emisiones de NO<sub>x</sub>, como se ilustra en la Figura 7.

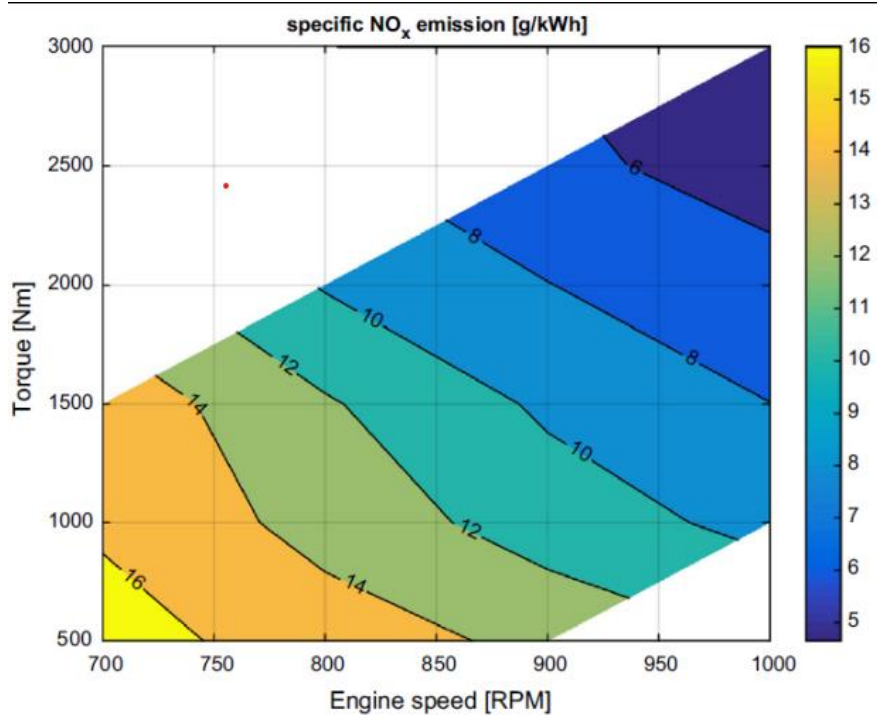


Figura 7. Resultados del estudio de emisiones de NO<sub>x</sub>  
 Fuente: (Sold by Cat, 2020)

En determinadas aplicaciones muy específicas, como la necesidad de garantizar la capacidad DP (posicionamiento dinámico), el requisito de una reserva de energía suficiente para mantener el sistema a salvo de fallas tiene un alto costo de inversión. Para superar esto, Wärtsilä ofrece una variante patentada de la arquitectura de un sistema de propulsión de CA (corriente alterna) estándar, como se muestra en la Figura 8, en la que los sistemas de bus que complementan los dos grupos electrógenos están aislados entre sí con un transformador de cambio de fase (Ballou et al., 2019).

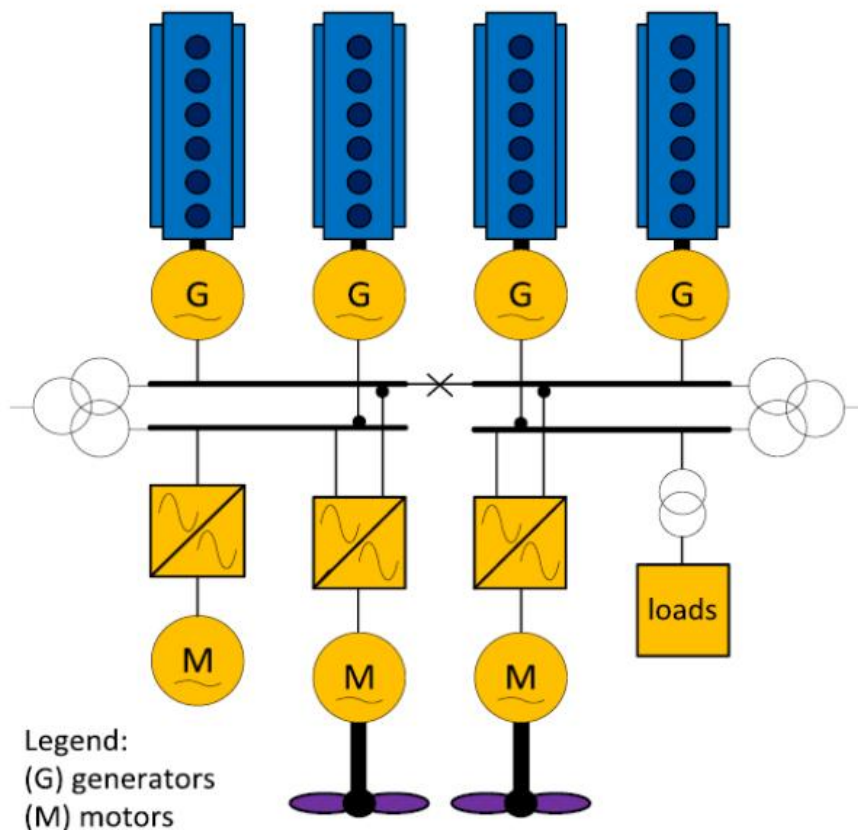


Figura 8. Esquema de propulsión eléctrica con buses de fases separadas.  
 Fuente: (Du et al., 2015)

Esto mitiga la necesidad de transformadores de propulsión de cambio de fase (utilizados en unidades de propulsión convencionales) y reduce el impacto de una falla del bus al 25% de la potencia instalada en lugar del 50%.

### 2.2.5. Barcos con sistemas de propulsión de hidrógeno

El hidrógeno (H<sub>2</sub>) se diferencia de otros combustibles en que puede producirse y utilizarse sin liberar gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>. El H<sub>2</sub> es un elemento a tener en cuenta en los futuros sistemas energéticos debido a que no es contaminante. El hidrógeno se puede obtener utilizando energía renovable y puede convertirse en un eslabón crucial en un ciclo global de energía renovable.



Las propiedades físicas y químicas del hidrógeno hacen que su uso sea más ventajoso que el de los combustibles fósiles. El hidrógeno es una molécula sencilla y no tóxica que genera energía de forma limpia y eficiente, incluso de forma silenciosa y sin combustión. El uso generalizado ha sido un desafío, debido a su baja densidad energética en comparación con los combustibles convencionales (hidrocarburos). La densidad de energía tiene implicaciones fundamentalmente para la viabilidad del transporte impulsado por H<sub>2</sub>, ya que se requiere de capital, materiales, volumen y energía para el almacenamiento a bordo (Chilig, 2023).

Debido a los elevados costes asociados a este tipo de sistemas, es necesario establecer estrategias para conseguir beneficios del uso de este tipo de sistemas, tanto en términos de desarrollo tecnológico como de infraestructuras de repostaje de H<sub>2</sub> para su uso a bordo. En consecuencia, con estas mejoras tecnológicas, el almacenamiento de hidrógeno a bordo podría volverse más viable, convirtiéndose en un combustible de interés para los sistemas de transporte.

A diferencia de los combustibles de hidrocarburos poliatómicos como la gasolina (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>), el H<sub>2</sub> consta de sólo dos átomos monovalentes. Esta estructura única proporciona características de combustión extremas al H<sub>2</sub>, por ejemplo, baja energía de ignición, baja emisividad, amplios límites de inflamabilidad, alta velocidad de llama y propiedades como alta difusividad, conductividad térmica, flotabilidad e incompresibilidad. El punto de ebullición extremadamente bajo (20,3 K), sólo superado por el helio, confiere al LH<sub>2</sub> (hidrógeno líquido) un gran coeficiente de expansión térmica. LH<sub>2</sub> se expande más del 30% entre 20K y 30K (Maggos et al., 2017).

Particularmente impresionante es la bajísima densidad atómica del H<sub>2</sub>, tanto como gas comprimido como como líquido criogénico. Hay menos átomos de hidrógeno en

el LH2 (en volumen) que, en los hidruros metálicos, los combustibles líquidos moleculares más comunes como el octano (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>), el etanol (CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH), el metanol (CH<sub>3</sub>OH), el metano líquido criogénico (LCH<sub>4</sub>), el amoníaco (NH<sub>3</sub>), hidracina (N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) e incluso H<sub>2</sub>O.

La reducción de las emisiones en los buques modernos es una cuestión importante, como ya se ha mencionado. El uso de pilas de combustible como fuente de energía resuelve este problema, pero plantea otras preocupaciones. Estas preocupaciones tienen que ver con el diseño del barco, con el fin de resolver problemas tecnológicos con sistemas, sistemas de almacenamiento y distribución de hidrógeno y baterías de pila de combustible. Reducir las emisiones de gases de evacuación, mejorar la eficiencia térmica, reducir los niveles de ruido y vibraciones son los principales objetivos del diseño y operación de sistemas navales modernos (MAN Energy Solutions, 2021).

Generalmente, una pila de combustible es una estructura dividida y consta de una batería de pilas de combustible individuales. Cada celda tiene un ánodo y un cátodo, separados por una capa cerámica donde se coloca un electrolito específico. Se coloca un catalizador en el ánodo para acelerar la reacción. La corriente continua producida es proporcional a la magnitud de la reacción electroquímica según la ley de Faraday<sup>4</sup>.

Los motores eléctricos determinan la potencia máxima y el par de tracción, siempre que las pilas de combustible y el sistema de almacenamiento sean capaces de proporcionar esta energía. El gas hidrógeno debe comprimirse a una presión extremadamente alta de 5000 a 10 000 psi para permitir un almacenamiento suficiente

---

<sup>4</sup> La ley de Faraday o ley de Inducción Electromagnética relaciona la fuerza electromotriz  $\varepsilon$  generada entre dos terminales de un conductor sometido a la variación del flujo magnético  $\Phi$  [Wb], con la magnitud de la variación del flujo en función de un intervalo de tiempo en el que ocurre dicha variación.

de combustible para lograr un rango adecuado. El funcionamiento de una pila de combustible consta de dos reacciones catalíticas. Un catalizador descompone el hidrógeno del ánodo en protones cargados positivamente y electrones cargados negativamente. Los electrones pasan en la corriente eléctrica y los protones se mueven a través del electrolito hasta el cátodo. En el cátodo, los protones se unen catalíticamente con el oxígeno y los electrones que provienen de la corriente eléctrica; este proceso se ejemplifica en la Figura 9 (Jinbo et al., 2022).

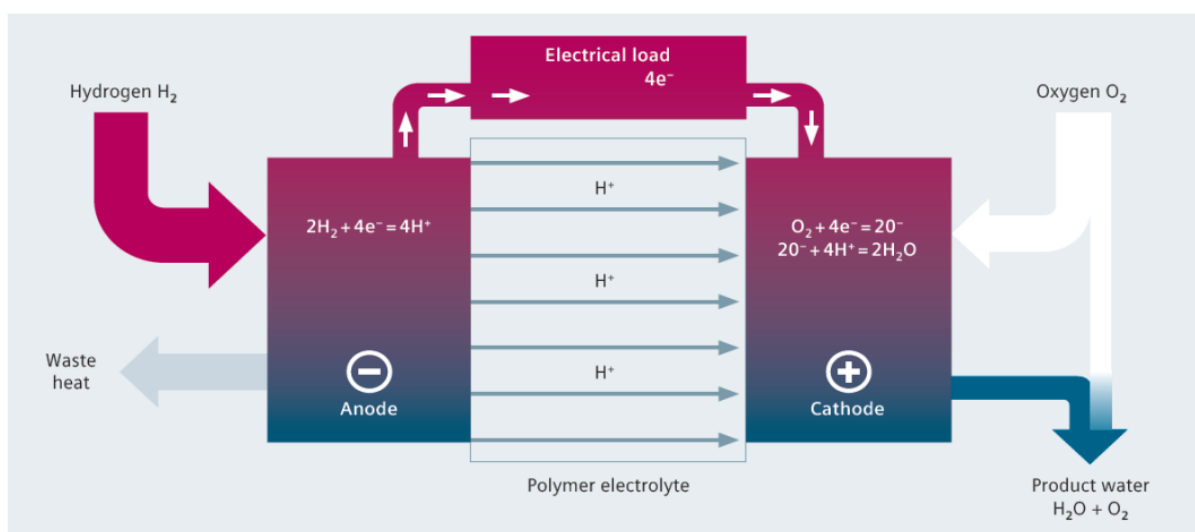


Figura 9. Principio funcional de una pila de combustible  
Fuente: (MAN Energy Solutions, 2021)

Los sistemas de Pilas de Combustible de hidrógeno son los únicos medios que no emiten gases nocivos al medio ambiente, el agua es el único producto y no interviene ningún proceso de combustión en el funcionamiento. Teóricamente, el procesamiento de gasolina, metanol y otros combustibles carbonosos con gases ricos en hidrógeno adecuados para su uso en pilas de combustible también podría realizarse sin la formación de contaminantes, siendo el agua y el  $CO_2$  los únicos productos de reacción.

En la práctica, el funcionamiento del procesador de combustible y del sistema de pila de combustible implica procesos de combustión auxiliares y, por lo tanto, existe la posibilidad de que se formen NOx y productos de combustión incompleta como CO y gases o vapores carbonosos. Sin embargo, bajo las condiciones químicas imperantes y las restricciones al correcto funcionamiento de las pilas de combustible que funcionan con metanol y gasolina, estas emisiones deben ser cercanas a cero para los NOx y extremadamente bajas para los contaminantes carbonosos, incluido el CO (Chilig, 2023).

## 2.3. ALTERNATIVAS DEFINIDAS AL ESCAPE / EMISIÓN

### 2.3.1. Sistema *Scrubber*

El sistema *Scrubber* es una tecnología de postratamiento para reducir las emisiones de SOx. Hay dos tipos de tecnología de lavado, húmedo y seco, y el principio químico es el mismo en ambos sistemas, que es el “lavado” de los gases de evacuación antes de ser liberados a la atmósfera.

Tabla 2. Sistemas de reducción *Scrubber*

<p><b><i>Wet Scrubber de SOx</i></b></p>	<p>El lavado húmedo requiere al menos los siguientes componentes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Unidad <i>Scrubber</i>: componente principal, que trae el agua que entra en contacto con los gases de evacuación, generalmente dispuestos en el sistema de evacuación en posición elevada y alrededor de los respectivos ductos;</li> <li>• Planta de tratamiento para acondicionar el agua tratada antes de su descarga al mar;</li> <li>• Depósito de lodos para residuos separados del agua de tratamiento;</li> <li>• Sistema de control y seguimiento de emisiones;</li> </ul>
--	--

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bombas auxiliares, tuberías, refrigeradores y tanques que sean necesarios para el sistema;</li> <li>• Algunas instalaciones pueden requerir un recalentador para aumentar la temperatura de los gases de escape por encima del punto de rocío y/o un medio para eliminar las gotas de agua.</li> <li>• El Wet Scrubber no puede producir una contrapresión de combustión mayor a la establecida por el fabricante de la unidad en la que se certificaron los límites de emisión de NOx del motor. Se recomienda una correcta evaluación del Scrubber para permitir un diseño optimizado, con eventual selección de equipos más pequeños, reduciendo el espacio requerido para la instalación del sistema, los costos de fabricante, modificaciones al barco y estructuras necesarias asociadas.</li> </ul>
<p><b>Dry Scrubber de SOx</b></p>	<p>El lavado en seco requiere de los siguientes componentes principales:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Unidad de lavado: componente principal, en el que el gas de evacuación entra en contacto con los pequeños granos de hidróxido de calcio. Debido a las características del Reaction Scrubber, puede situarse antes de cualquier equipo de recuperación de calor residual o SCR porque la reacción libera calor.</li> <li>• Silo de alimentación de granos y transportador de descarga ubicados en la parte superior e inferior de la Scrubber, respectivamente.</li> <li>• Sistema de control y monitoreo de emisiones capaz de ajustar el correcto flujo de granos a través del Scrubber.</li> <li>• Sistema neumático con tubería flexible para transporte de granos y retorno y almacenamiento a bordo.</li> <li>• Los granos son esferas de hidróxido de calcio con un tamaño entre 2 y 8 mm de diámetro.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

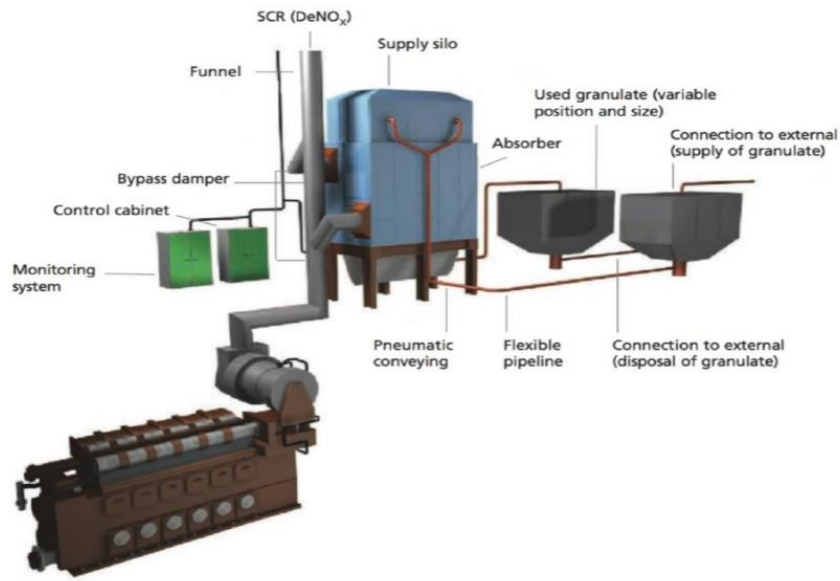


Figura 10 . Fregadora en seco con sistema de granos  
Fuente: (Dokkum, 2016)

### 2.3.2. Reducción selectiva no catalítica (SNCR)

Las emisiones de NO<sub>x</sub> procedentes de la combustión se convierten en nitrógeno y agua mediante la inyección de un reactivo químico a base de nitrógeno, más conocido como urea (NH<sub>2</sub>CONH<sub>2</sub>) o amoníaco (NH<sub>3</sub>). Las reacciones químicas, en forma simplificada, son las siguientes:}

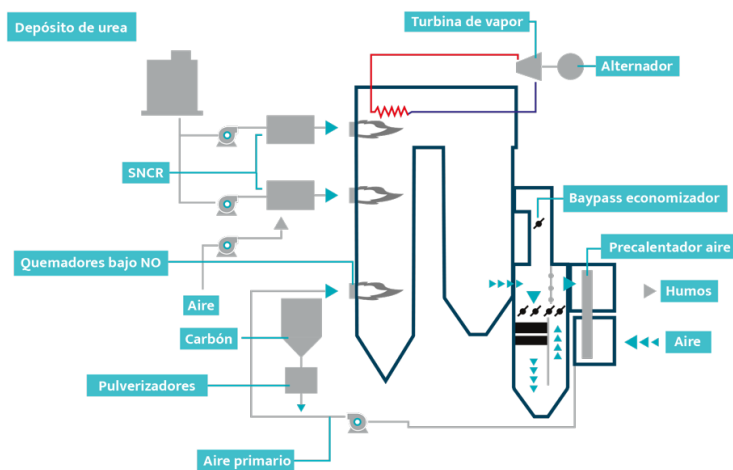


Figura 11. Reducción selectiva no catalítica (SNCR)  
Fuente: (Dowling, 2023)

La mayor reducción de NOx se logra a temperaturas entre 870 y 1.200°C; el reactivo debe introducirse antes de enfriar los gases de escape. La eficiencia de eliminación es del 30% al 40%. En el caso de SNCR, el uso de amoníaco puede ser una cuestión más importante que para SCR.

### **2.3.3. Reducción Catalítica Selectiva (SCR)**

La SCR es similar a la SNCR en que utiliza la inyección de amoníaco en los gases de combustión para convertir las emisiones de NOx en nitrógeno elemental y agua. La diferencia clave entre estos es la presencia en los sistemas SCR de un catalizador que acelera las reacciones químicas. El catalizador es necesario porque los sistemas operan a temperaturas mucho más bajas en comparación con el sistema SNCR. Las temperaturas típicas para este son de 340°C a 380°C, en comparación con 870°C a 1200°C para SNCR. La superficie activa del catalizador suele estar reforzada con metal, cerámica o fibra (Fagerhol et al., 2010).

Los catalizadores generalmente están hechos de óxidos de metales pesados, que consisten en el material base TiO<sub>2</sub> (dióxido de titanio) y componentes activos de vanadio, tungsteno, molibdeno, cobre y cromo. Como estos catalizadores no se modifican químicamente en el proceso, su vida útil es generalmente muy larga y su cambio sólo es necesario después de 4 a 6 años de uso. El proceso de cambio generalmente implica eliminar partículas sólidas en los catalizadores mediante vacío, lavado de los catalizadores en baños ácidos y secado de los catalizadores lavados. Las partículas sólidas eliminadas generalmente consisten en partículas de ceniza y, por lo tanto, pueden eliminarse de manera similar.

El proceso SCR es una tecnología de control de NOx posterior a la combustión que elimina los NOx de los gases de escape. Cuando los gases de escape pasan por

el catalizador SCR, el NOx de los gases reacciona con el amoníaco (un reactivo) y se reduce a N2 y vapor de agua (Sentís, 2019).

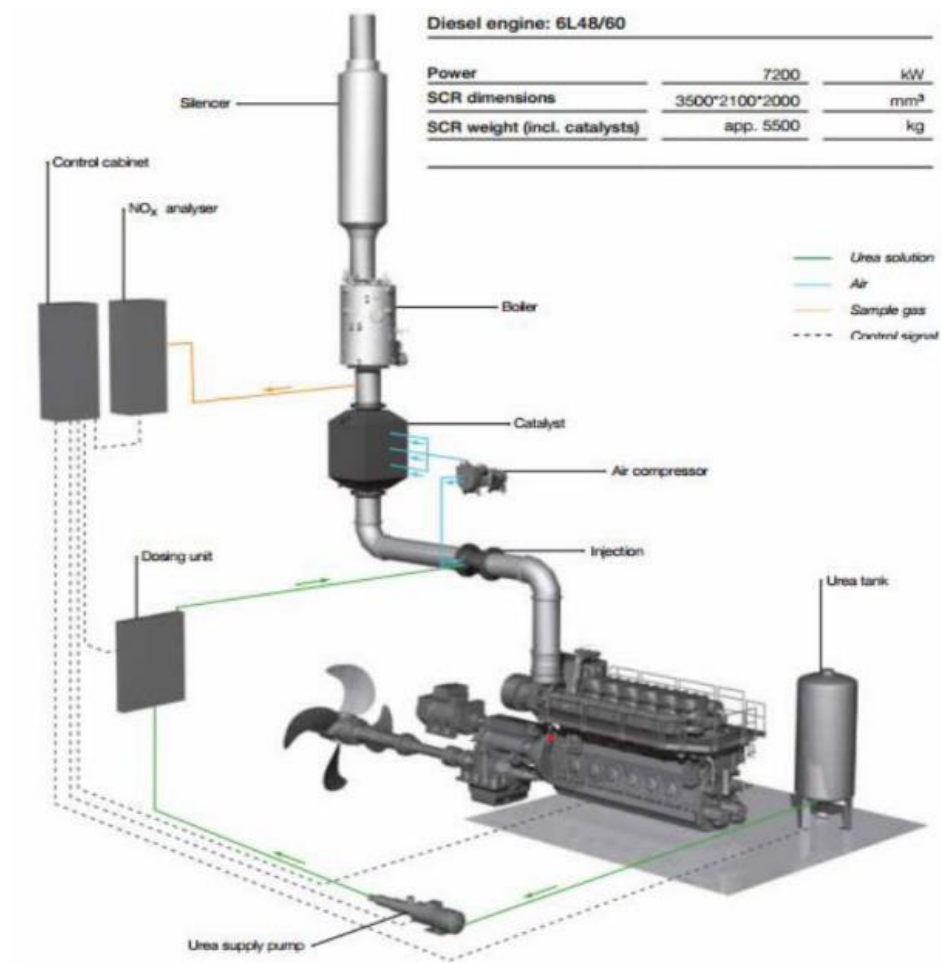


Figura 12. Esquema de un sistema SCR  
Fuente: (Guanzhen, 2020)

Se generará gas amoníaco a partir de urea para el sistema de conversión de amoníaco: cuando la urea reacciona con agua en un ambiente calentado, hidroliza el amoníaco y se descompone en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), nitrógeno (N<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O). La eficiencia típica de eliminación de NOx del SCR es del 90 % al 99 %. Al compararlo con el SNCR, existe un ligero aumento en el consumo de energía auxiliar, mientras que la presencia de amoníaco se puede controlar más fácilmente dentro del límite aceptable debido a la presencia de catalizadores (López, 2020).



Sin embargo, el funcionamiento de este equipo aumenta el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub>. Esta tecnología se puede utilizar en barcos nuevos y ya construidos. Su principal inconveniente es el aumento del consumo y el peligro de corrosión que provoca el amoniaco en los conductos de evacuación. El uso de SCR es ampliamente conocido, pero aún no se utiliza su uso en combinación con un sistema Scrubber.

#### **2.3.4. Recirculación de gases de escape (EGR)**

El sistema EGR es una tecnología que ya es muy utilizada en el ámbito de la automoción, pero que está empezando a desarrollarse en entornos marítimos. Alimenta los gases de escape al turbocompresor y los reintroduce en los cilindros. Esto reduce el contenido de oxígeno y aumenta el calor resultante de una reducción de las temperaturas máximas de combustión y por tanto se disminuye la formación de NO<sub>x</sub>. Las primeras pruebas en motores diésel marinos (MGO o HFO) que utilizan el sistema EGR mostraron un aumento de las emisiones de partículas (PM), la acidificación del aceite y una reducción del rendimiento del motor (Lewis y Syrmos, 2022)

La solución a la acidificación es utilizar un depurador para limpiar al menos el 80% del azufre de los gases de escape antes de purgar el turbocompresor. El rendimiento del motor se puede mejorar si no se utiliza un sistema EGR ajustando los parámetros del proceso de inyección y combustión. Respecto a la emisión de PM, sólo se pueden aplicar técnicas de filtrado para evitar su liberación a la atmósfera. Los sistemas EGR de primera generación con un sistema Scrubber integrado pueden eliminar alrededor del 80% del azufre que podría liberarse y alrededor del 85% de los NO<sub>x</sub>.

En la Figura 13 podemos ver los componentes principales de un sistema EGR. Un depurador situado antes del turbocompresor, para reducir los SO<sub>x</sub> antes de que parte

de los gases se reciclan en la cámara de combustión. Un sistema que reduce la temperatura de los gases reciclados y, finalmente, un medio que aumenta la presencia de los gases antes de su reciclaje (Chuang y Sverre, 2023).

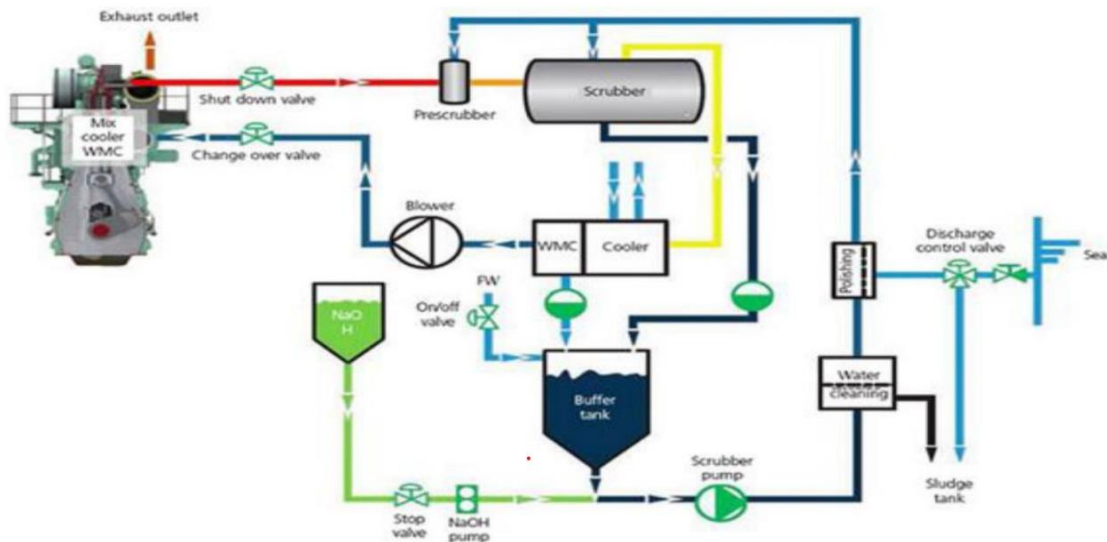


Figura 13. Esquema de un sistema EGR  
Fuente: (Feng y otros, 2022)

Los motores del futuro podrán integrar el sistema EGR, ajustándolo del mismo modo que, por ejemplo, un intercooler. La siguiente ilustración muestra un primer concepto de las piezas de EGR en amarillo.



Figura 14. Sistema EGR en el futuro.  
Fuente: (Kapusuz y otros, 2021)

### 2.3.5. Combustibles bajos en azufre

Para cumplir con la normativa de emisiones de SO<sub>x</sub> consiste en utilizar combustibles que contengan una cantidad muy baja de azufre. Este tipo de combustible cuesta aproximadamente un 50% más, sin embargo, simplifica la posibilidad de navegar en ECA ya que los barcos que usan MGO y otros que usan HFO no requieren grandes modificaciones en el motor ni modificaciones en el sistema de gases de evacuación, requiriendo únicamente poner un Scrubber.

Es la forma más sencilla de controlar el azufre en ECA y, probablemente, ajustando el motor del barco también sería posible regular las emisiones de NO<sub>x</sub>. Sin embargo, debido a cambios en la viscosidad, propiedades lubricantes y diferencias de pH (más ácido) del MGO, algunas. Los motores (normalmente los más antiguos) no pueden utilizar este tipo de combustible, por lo que, en estos casos, estos barcos deben tomar otras opciones para cumplir con los requisitos de ECA (Dnv, 2018).

### **3. CAPÍTULO III: ANALISIS COMPARATIVO Y APLICABILIDAD EN EL PAÍS**

Como sabemos, a partir del 1 de enero de 2015, según la nueva regulación del Anexo VI del convenio MARPOL, todos los barcos que naveguen en la ECA deben consumir combustible con un contenido de azufre inferior al 0,1%. El hito que se viene produciendo desde el 1 de enero de 2020, en el que la OMI decidió ampliar su entrada en vigor, todos los buques deberán consumir combustible con un contenido de azufre inferior al 0,5%, fuera del ECA.

Las alternativas mencionadas anteriormente están revolucionando la industria marítima, que ha enfrentado varios desafíos, desde la transición de los inicios del consumo de carbón a la locomoción, pasando por los combustibles líquidos. Aunque se están investigando nuevos tipos de combustible, todavía no se han producido grandes avances en este campo, siendo los dos únicos combustibles fósiles regulados el diésel marino (MGO) y el GNL, que por su propia composición carece de azufre.

Para mitigar las emisiones provenientes de la quema de combustibles, fue necesario desarrollar nuevos sistemas y medios tecnológicos para reducir esas mismas emisiones nocivas para el medio ambiente y la salud. El uso de sistemas Scrubber requiere importantes inversiones iniciales, generalmente inferiores a las necesarias para el uso de sistemas de GNL como combustible.

Las opciones de cumplimiento asociadas con los países ECA para barcos nuevos incluyen el uso de sistemas de control de gases de escape (por ejemplo, SCR), el cambio de combustible a diésel marino (MGO) o gas natural licuado (GNL) o la instalación de controles del sistema base del motor (por ejemplo, EGR). Otras tecnologías (por ejemplo, biocombustibles e inyección de agua) también están en desarrollo, pero aún no han logrado una adopción a gran escala.

Para valorar cuál de las alternativas antes mencionadas es la más adecuada para Ecuador, es necesario analizar aspectos como las zonas de navegación del buque, su antigüedad, así como los costos fijos y operativos específicos de cada alternativa. En este capítulo se discutirán los beneficios y desafíos de cada una de las alternativas, con pequeñas referencias a los aspectos económicos de cada sistema teniendo en cuenta las dificultades técnicas que surgen de los mismos.

### **3.1. BENEFICIOS Y DESAFÍOS DE CADA ALTERNATIVA**

#### **3.1.1. Navíos LNG**

##### ***Beneficios***

Los principales beneficios de utilizar este tipo de alternativas son comunes a MGO, como resultado de no utilizar sistemas que utilicen HFO. Desaparece la necesidad de pretratamiento del combustible, lo que a su vez implica consumo de combustible. El volumen de residuos que se producen a bordo a partir del combustible es reducido y no tiene los problemas de compatibilidad que presentan los combustibles. No presenta problemas de calidad por las impurezas que tiene el HFO, como altos niveles de sedimentos, cenizas o aceites. Es una de las alternativas que más reduce emisiones.

Entre las principales ventajas específicas del uso de GNL, se puede señalar que el precio del GNL a lo largo de los años ha sido menor en comparación con el del MGO y el HFO. Debido a este factor, en 2020 los puertos consultados estimaron que el suministro de GNL alcanzaría una cuota de mercado en combustibles tradicionales del 13% y que será del 24% en 2025 (Ching-Yeh et al., 2016).

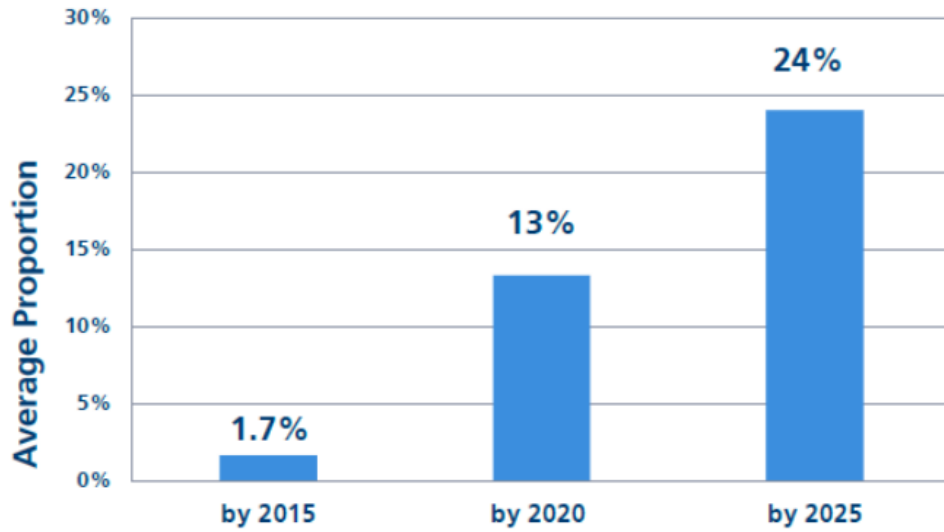


Figura 15. Estimativa de Mercado de LNG  
Fuente: (Ching-Yeh y otros, 2016)

La tecnología de propulsión de GNL se ha utilizado durante décadas en varios tipos de buques, lo que la convierte en un sistema probado. Un motor que sólo funciona con gasolina tiene una mayor reducción de emisiones que los otros dos combustibles.

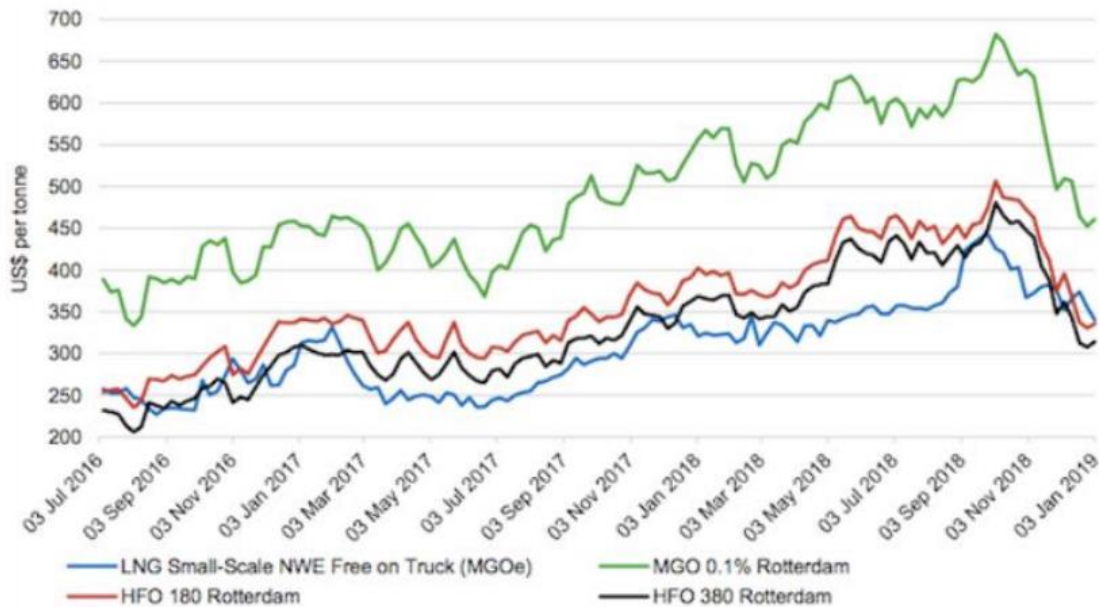


Figura 16. Precios del combustible en el norte de Europa (GNL como combustible de transporte en el norte de Europa)  
Fuente: Global Maritime Hub, s.f.)

## ***Desafíos***

El coste de inversión es bastante elevado, impulsado principalmente por los costes de almacenamiento e instalación criogénica. Este tipo de propulsión requiere aproximadamente 3,5 veces más espacio a bordo para almacenar GNL en condiciones criogénicas que el volumen necesario para almacenar combustible tradicional. Este factor no tiene en cuenta el volumen necesario para los equipos de preparación y regasificación de gas para su consumo. La pérdida de ingresos por menos espacio de carga podría rondar el 3% para los portacontenedores.

El fenómeno de que el metano pueda "escaparse" no está totalmente controlado. Esta fuga de metano procedente de residuos de combustible no utilizados tiene una contribución potencial al calentamiento global aproximadamente 23 veces mayor que el CO<sub>2</sub> (Dnv, 2018).

El tratamiento de la ebullición durante los periodos de inactividad del buque no está totalmente resuelto. Salvo en el norte de Europa y en determinados proyectos específicos, no existe una infraestructura bien desarrollada para el suministro de GNL y todavía no existen códigos aprobados internacionalmente para el uso de GNL como combustible. Existe una gran falta de legislación sobre el uso de GNL y son inexistentes programas de capacitación y aprendizaje sobre el manejo de este combustible para tripulaciones que sólo trabajan con combustibles tradicionales.

### **3.1.2. Navíos dual fuel**

#### ***Beneficios***

Luego de analizar un poco sobre el sistema Dual-Fuel en general, se destacó que hoy en día tecnologías capaces de cumplir con futuras regulaciones podrían ser los motores Dual-Fuel. Los motores principales marinos ya no están restringidos a un

solo tipo de combustible debido a la aparición del motor Dual-Fuel, pudiendo elegir combustible gas natural o diésel según las necesidades, como ya se mencionó en el capítulo anterior. En la situación actual, el motor Dual-Fuel tiene mejores características de emisiones y eficiencia energética al utilizar gas natural.

Un barco con motores Dual-Fuel puede elegir combustible libremente de acuerdo con la volatilidad de los precios del mercado de combustible, por lo que puede ahorrar costos de combustible, al mismo tiempo puede ampliar las áreas de navegación del barco porque, de esta manera, puede asegurar que el barco entre en zonas que tienen límites de emisión como ECA (Jisheng, 2018).

Una de las principales características de este tipo de sistemas es que el tipo de combustible se puede convertir de manera flexible durante la operación, puede funcionar con bajas emisiones, alta eficiencia y en un estado estabilizado. Las emisiones de NOx y CO2 se reducirán al utilizar gas natural como combustible, como se puede observar en las Figura 17 y Figura 18.

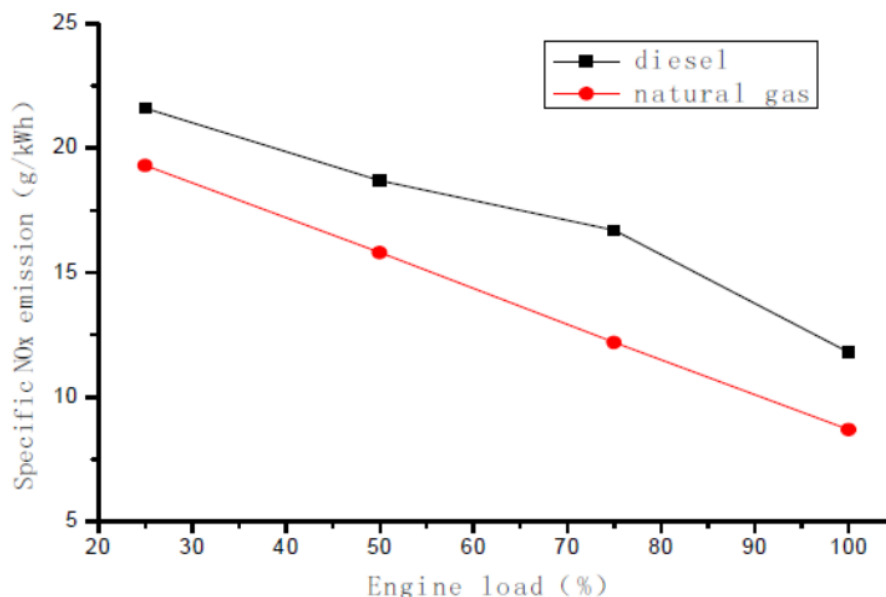


Figura 17. Emisiones específicas de NOX  
Fuente: (Dnv, 2018)



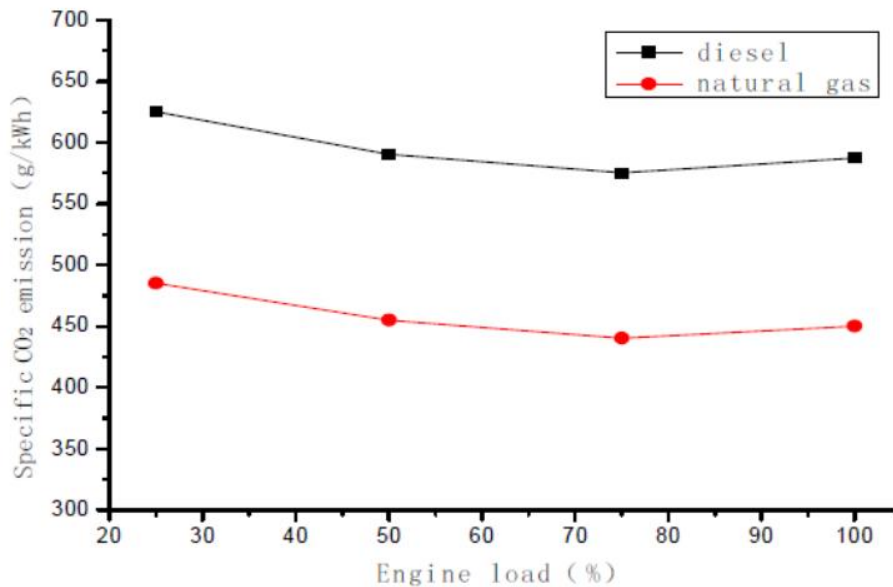


Figura 18. Emisiones específicas de CO2  
Fuente: (Dnv, 2018)

La tasa de emisión de NOX disminuye al aumentar la carga y la reducción de emisiones de NOX es mejor con una operación de carga del 75%. La tasa de emisiones de NOX de los motores que funcionan con gas natural y diésel es de 11,9 g/kWh y 15,7 g/kWh, respectivamente; la tasa de emisiones de NOX disminuyó un 24,2%.

En comparación con los sistemas Dual-Fuel Diesel-Eléctricos, tienen una mejor eficiencia de propulsión térmica, tanto durante la navegación como en los puertos. Menor potencia instalada, ya que la planta eléctrica sirve tanto para la carga de propulsión para la navegación como para la carga portuaria, la redundancia aumenta con el uso de 4 motores (Jisheng, 2018).

La capacidad de carga aumenta dentro de las mismas dimensiones generales del barco y las tripulaciones tienen más experiencia en este tipo de sistemas diésel-eléctricos, ya que están más disponibles. El sistema de propulsión eléctrica es más eficiente de operar y más rápido de encender y apagar.

## **Desafíos**

A pesar de las perspectivas optimistas para la aplicación de los motores de combustible dual, su aplicación en los buques es difícil. Los motores Dual-Fuel sólo pueden demostrar plenamente sus principales ventajas utilizando gas natural como combustible principal, lo que lleva a una gran dependencia de la existencia de infraestructuras adecuadas, es decir, la existencia de acciones propias de suministro de GNL en los puertos, aunque muchos países están invirtiendo en este tipo de sistemas para el repostaje de buques de GNL. Este proceso necesita tiempo para implementarse y, actualmente, la red de estaciones de servicio de GNL aún está en sus inicios.

El cambio de un motor normal a un motor Dual-Fuel requiere de muchos equipos auxiliares, como un depósito especial para almacenar gas natural, el sistema de suministro de gas, el sistema de gas inerte, entre otros, y estos dispositivos son costosos. Además, la conversión del sistema de propulsión puede tener efectos en la estructura original del buque. La conversión de esta instalación en buques se tiene que realizar en tiempos cortos y existen pocos especialistas con los conocimientos necesarios para llevar a cabo su mantenimiento y reparación, siendo difícil el mantenimiento y reparación saludable a bordo. Los buques que utilizan GNL y transportan gas natural pueden utilizar cómodamente en este tipo de motor utilizando directamente el gas natural evaporado durante el transporte. Pero, debido a las mercancías que transportan este tipo de barcos, sólo se pueden navegar determinadas rutas (Lewis y Syrmos, 2022).

Teniendo en cuenta los sistemas de propulsión Diesel-Eléctrico, haciendo un punto de comparación, se ha comprobado que las turbinas de vapor son más confiables en todo su ciclo de vida que los motores Dual-Fuel, y las plantas de turbinas

de vapor requieren menos mantenimiento que los sistemas DF. Los motores DF-Diesel-Eléctricos tienen un alto consumo de aceite lubricante y los recipientes de este tipo necesitan equipos adicionales para lidiar con el exceso de BOG (Boil-off gas).

### **3.1.3. Navíos Diésel-Eléctrico**

#### ***Beneficios***

Teniendo en cuenta que se trata de un tipo de sistema híbrido, entre sus prestaciones se incluirán las ventajas de cada uno de los sistemas de propulsión. La propulsión mecánica es generalmente más eficiente a la velocidad de diseño, entre el 80% y el 100% de la velocidad máxima. En este rango el motor diésel opera en su punto de trabajo más eficiente, como se ilustra en la Figura 19.

La propulsión mecánica implica sólo tres componentes en el proceso de conversión de energía, a saber, el motor térmico, la caja de cambios y la hélice, que generalmente funcionan bien y funcionan de manera eficiente. Para cumplir con los niveles II y ahora nivel III establecidos por la OMI, hay motores que tienen una menor potencia de salida, lo que conlleva menores emisiones de NOx, y lo contrario significa que la existencia de un motor con una mayor potencia de salida aumentará las emisiones.

El uso de propulsión mecánica tiene la ventaja de un bajo coste de compra, debido a su baja complejidad. Esto justifica la aplicación de la propulsión mecánica a los buques de transporte de carga (OMI, 2012).

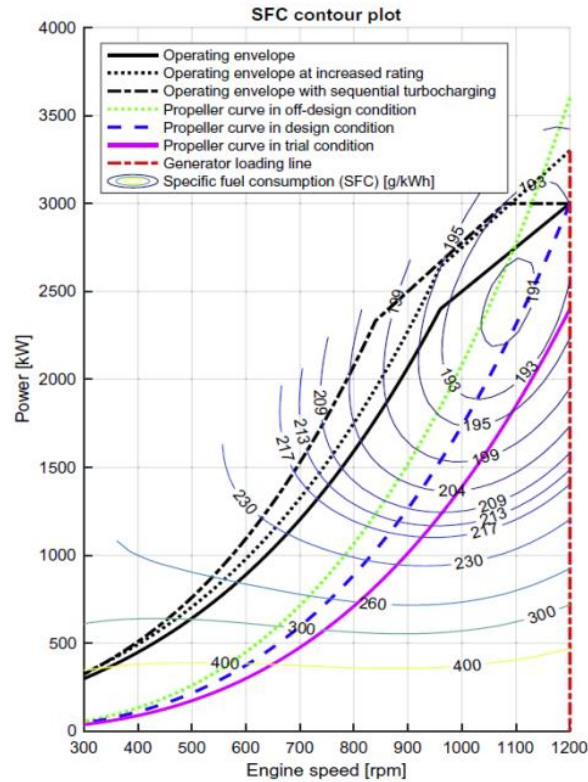


Figura 19. Curvas de funcionamiento dos motores Diesel  
Fuente: (Chen H. , 2021)

En el caso de los buques de carga, el consumo de combustible y las emisiones se pueden reducir recuperando el calor residual de los gases de escape y enfriando el agua para generar energía eléctrica auxiliar y calefacción, lo que se traduce en un mejor uso. Con el uso de un CPP (Controllable Pitch Propeller) gracias a la energía eléctrica generada, que añade mayor libertad de maniobra al barco, haciendo un poco más complejo el sistema de propulsión (Chen H. , 2021).

En cuanto a los beneficios de la tecnología eléctrica que forma parte del sistema híbrido, la propulsión eléctrica tiene un bajo consumo de combustible ya que esta energía puede almacenarse en baterías, rentabilizando el consumo de combustible por parte de los generadores. La energía eléctrica producida a partir de generadores se puede utilizar directamente para la propulsión, pudiendo también garantizarse esta propulsión a partir de baterías, lo que hace que este sistema tenga

un perfil operativo diferente ya que lo hace capaz de realizar varios tipos de funciones en diferentes clases de barcos. Para poder extraer rendimiento de este sistema, la energía generada por el sistema debe estar bien cuantificada para cumplir con los requisitos esenciales para la propulsión sin crear un exceso de producción que no se aprovechará y, por tanto, se desperdiciará. Esta estrategia de control garantiza que los motores o generadores de energía eléctrica no funcionen de manera ineficiente y a menudo se la denomina central eléctrica.

Las emisiones de NOx de la propulsión eléctrica son menores, en comparación con las de la propulsión de un sistema mecánico, porque la potencia gastada para propulsar el barco se divide. Por ejemplo, un crucero con una potencia de propulsión de 20 MW por eje normalmente tiene instalados 5 generadores diésel, con una velocidad de 720 rpm, mientras que otro crucero con propulsión únicamente mecánica, con los mismos 20 MW por eje, normalmente, tiene dos. Los motores principales funcionan cada uno a una velocidad máxima de 500 rpm. Considerando el nivel II del límite de emisiones de NOx, esto supondría una emisión media de 9,7 g/kWh de NOx para los generadores diésel utilizados en propulsión eléctrica y de 10,5 o 14,4 g/kWh para los motores diésel de cuatro ruedas o dos tiempos utilizados en propulsión mecánica. Además, debido al concepto del sistema de propulsión eléctrica, los generadores diésel funcionan más cerca del punto de diseño, en el que normalmente tienen menores emisiones de NOx o requieren un menor consumo de combustible (Altosole, 2010).

La propulsión eléctrica requiere un mantenimiento reducido, ya que la propulsión y la carga auxiliar se comparten y se apagan cuando no se necesitan. La propulsión eléctrica provoca un nivel reducido de vibraciones perjudiciales para el funcionamiento de otros equipos debido al menor tamaño del eje de transmisión

mecánica del motor a la hélice. Para ello, el diseño del motor y del convertidor de potencia debe optimizarse para lograr una fluctuación mínima del par. La propulsión eléctrica tiene potencial para una alta disponibilidad, al menos si el sistema está diseñado para este propósito (Mora, 2022).

### ***Desafíos***

Teniendo en cuenta que este sistema es un conjunto de dos medios de conversión de energía, debe existir una combinación de factores para superar por ambos medios. En el sistema mecánico la maniobrabilidad es un poco más limitada porque, por regla general, un propulsor derivado de energía eléctrica permite una mayor flexibilidad, por ejemplo, el uso de propulsores de proa y popa hace más versátiles los cambios de dirección del barco. La maniobrabilidad de la propulsión mecánica siempre se puede mejorar con el uso de un CPP, pero sigue siendo limitada en comparación con los propulsores eléctricos que pueden disponerse en cualquier posición, es decir, pueden realizar un movimiento de 360°. Al aumentar el esfuerzo de trabajo, el motor también aumenta la probabilidad de que se dañen los componentes, requiriendo un mayor número de mantenimiento. Con la aplicación de un CPP, que puede ser una estrategia de control adecuada para reducir el esfuerzo derivado de las cargas necesarias para el funcionamiento del sistema de propulsión. La propulsión mecánica tiene una menor eficiencia de combustible y mayores emisiones cuando se viaja a velocidades inferiores al 70% de la velocidad máxima. En la propulsión mecánica, cuando un componente de un equipo esencial resulta dañado, a veces se pone en peligro el correcto funcionamiento de la propulsión de una embarcación, ya que el fallo de un componente fundamental puede provocar la pérdida de la propulsión.

Las emisiones de NOx del motor de propulsión principal están determinadas por su curva de funcionamiento. En la industria del automóvil, como se demostró en un estudio realizado con motores diésel para evaluar las emisiones de NOx, durante el perfil de aceleración las emisiones son muy superiores a los estándares actuales de 80 mg/km, no estando en línea con el nuevo ciclo de combustible europeo. Esta tendencia fue confirmada por mediciones de NOx realizadas en un motor marino de investigación MAN4L20/27 de 300 kW sin tecnología de reducción de NOx, realizadas en los Países Bajos en la Academia de Defensa de los Países Bajos (Martínez, 2019). Del mismo modo, es probable que el diésel utilizado en la propulsión mecánica durante la aceleración y el funcionamiento a altas velocidades produzca elevadas emisiones de NOx, ya que se requiere una mayor relación de presión de los gases de escape/admisión como resultado del trabajo del turbocompresor. Es probable que las emisiones de NOx de los buques en esta situación se produzcan a un ritmo mayor que el especificado en la norma de nivel II o III.

Es probable que las vibraciones causadas por el uso de tecnología mecánica sean mayores que las de un sistema originado por una conversión eléctrica, aunque las medidas de aislamiento pueden mejorar esto. Las vibraciones causadas por la cavitación ocurren, particularmente en condiciones dinámicas, pero pueden mejorarse con un CPP y planes de control adecuados.

En relación con el sistema eléctrico, debido a las fases de conversión adicionales en los convertidores de potencia y los motores eléctricos, la propulsión eléctrica genera mayores pérdidas. Estas pérdidas provocan un aumento del SFC (consumo específico de combustible), especialmente cerca de la velocidad máxima del barco. Los motores no necesitan trabajar con una carga elevada ya que esto se traduce en un alto consumo y mayores emisiones, por lo que las embarcaciones

actualmente operan a bajas velocidades para mejorar su autonomía, pero en cambio un motor cuando funciona a menores velocidades no requiere una carga tan elevada, y esto puede provocar problemas como carbonización en las cámaras de combustión, mal funcionamiento y desgaste (DNV-GL, 2018).

La mayoría de los barcos con propulsión eléctrica utilizan FPP (hélice de paso fijo), porque los motores eléctricos tienen variadores de velocidad que pueden proporcionar el par máximo en cada velocidad. Las vibraciones provocadas por la cavitación ponen en peligro el buen estado de la hélice, donde normalmente se utiliza la hélice de paso fijo para el control de velocidad, siendo una forma de control de motores eléctricos. La cavitación aumenta y potencialmente causa daños a la hélice, particularmente en el caso de la propulsión eléctrica con hélices de control de velocidad de paso fijo, así como en la propulsión mecánica con FPP.

Las diferencias de potencial de la red eléctrica y las fluctuaciones de frecuencia en condiciones de falla pueden causar que los sistemas eléctricos se apaguen, reduciendo así la confiabilidad y disponibilidad. Particularmente en sistemas eléctricos con gran cantidad de equipos que tienen la capacidad de variar la velocidad, lo que puede provocar inestabilidad (Chilig, 2023).

#### **3.1.4. Navíos de propulsión eléctrica**

##### ***Beneficios***

Es bien sabido que existe una enorme presión social para reducir las emisiones contaminantes y los motores eléctricos ayudan en este sentido. El número de motores eléctricos utilizados para propulsar barcos ha ido en aumento. Las principales ventajas de introducir sistemas de propulsión eléctricos son la simplificación general del sistema de propulsión, incluyendo una reducción de los equipos instalados, por lo



que se requerirá personal más especializado para realizar el correcto funcionamiento del respectivo sistema.

En el caso de buques que requieren mayor potencia para su funcionamiento, reducir el número de equipos ayuda a una mayor eficiencia en el mantenimiento y reparación, aumentando el ciclo de vida de una embarcación, con una gran reducción de las vibraciones y ruidos provocados a bordo, y una mejora en efectividad al utilizar este tipo de propulsión ya que las velocidades de rotación son siempre constantes.

El sistema genera una cantidad significativa de energía y el exceso de energía se utiliza y suministra a bombas de carga, bombas contra incendios y otra maquinaria auxiliar importante. El espacio necesario para la instalación de máquinas de propulsión eléctrica es mucho más reducido y compacto respecto a los sistemas convencionales. No existe una conexión directa entre el eje de la hélice y el motor principal, por lo que la transmisión mecánica de alta potencia y la vibración están restringidas. Hay más flexibilidad en la instalación de máquinas, lo que facilita el mantenimiento (Martinelli, 2014).

Este a su vez proporciona mayor maniobrabilidad y alta redundancia, hay un aumento de la carga útil gracias a la ubicación flexible de los componentes de la máquina. Menor consumo de combustible y, en consecuencia, reducción de emisiones, proporcionando un buen beneficio en términos medioambientales. Reducción de los costos del ciclo de vida a medida que disminuyen el consumo de combustible y los costos de mantenimiento, ya que disminuye el tiempo necesario para realizar una parada para mantenimiento u otro servicio.

La respuesta dinámica es mucho mejor a máxima velocidad de propulsión en comparación con otros sistemas. Menos tiempo de inversión en comparación con otros sistemas de propulsión y disponibilidad de par máximo en todas las velocidades

de la hélice, lo que proporciona una gran flexibilidad a la hora de elegir la velocidad del motor (Katsunori y Masamichi, 2020).

### **Desafíos**

Las desventajas incluyen un costo inicial más alto en comparación con los sistemas de propulsión de motores de combustión interna, ya que la energía convertida a partir del combustible no es completamente útil y no se convierte en el trabajo necesario para la propulsión.

En ocasiones, tratándose de un sistema diferente y mejorado, es necesario un equipo más especializado, ya que el sistema es completamente diferente al sistema mecánico e implica una gran automatización.

El desarrollo tecnológico está demostrando ser una forma de cubrir los costes de instalación, que es una de las principales desventajas de los sistemas de propulsión eléctrica. El sistema de propulsión eléctrica se utiliza, por ejemplo, en rompehielos que requieren un motor eléctrico de alta potencia capaz de proporcionar un par elevado a bajas velocidades. La industria también está trabajando para reducir el tamaño de este tipo de sistemas, con el fin de rentabilizar aún más el espacio utilizado en las salas de máquinas.

### **3.1.5. Barcos con sistemas de propulsión de hidrógeno**

#### **Beneficios**

El uso de este tipo de propulsión utilizando hidrógeno como medio combustible va en la línea de lo que se encuentra en el funcionamiento de los sistemas Fuel-Cell. Los cuales funcionan con hidrógeno, no necesitando ningún otro tipo de combustible para funcionar. En las pilas de combustible directas, se suministra hidrógeno puro a los electrodos. En las Fuel-Cells indirectas se utiliza un producto como vehículo de transporte de hidrógeno (metanol, amoníaco, hidracina, etc.), producto que, en una

primera fase, se convierte para garantizar cierta eficiencia en el proceso, dando como resultado, la formación de productos secundarios (como el CO<sub>2</sub>, por ejemplo, en el caso de una conversión de hidrocarburos)

En cualquier caso, el uso de un sistema de Pila de Combustible en los barcos reducirá las emisiones contaminantes respecto a los motores mecánicos convencionales, lo que significa que se producirá menos dióxido de carbono por unidad de energía, procedente fundamentalmente de combustibles fósiles, además de observarse una reducción significativa de la producción de ruido y vibraciones al utilizar este sistema, lo que aumenta el uso operativo del barco. La ventaja medioambiental es grande ya que el uso de hidrógeno como combustible, para producir energía eléctrica a partir de reacciones de electrólisis, reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación con el uso de otros tipos de combustibles.

Además de las ventajas básicas, el sistema Fuel-Cell con membrana de polímero sólido PEM (Polymer Electrolyte Membrane), sistema utilizado en los submarinos de la clase Tridente de la Armada portuguesa, también presenta otras ventajas. Su comportamiento es rápido de encendido y apagado, baja degradación por la tensión producida y larga vida útil. Las cargas y temperaturas son favorables para el comportamiento del ciclo. Tiene una buena capacidad de funcionamiento en sobrecarga y funciona a una temperatura de funcionamiento baja (80°C) y sin electrolito líquido corrosivo.

### ***Desafíos***

Se reconoce que la tecnología Fuel-Cell es todavía un medio de propulsión poco publicitado, para convertirse en una alternativa viable y realista para soluciones futuras en activos navales. Uno de los más importantes es la necesidad de impulsar

una tecnología que tenga éxito en el mercado, generando así una producción en masa que conlleve una reducción de costes a la hora de instalar este tipo de sistemas.

Otro obstáculo es cómo producir hidrógeno y otros combustibles nuevos, como el metanol. Se están produciendo cambios políticos que se observan en muchos países, lo que ayuda a resolver los problemas relacionados con este sistema. Por ejemplo, en Noruega, el gobierno ha creado varias estructuras para ferries que utilizan este sistema de propulsión y licencias para nuevas soluciones de rutas (Vúlic et la., 2016).

Aún será necesario abordar varios desafíos antes de que los sistemas de pila de combustible puedan cumplir todos los requisitos necesarios para los activos marítimos y puedan competir con las soluciones marítimas de última generación. Es necesario un mayor desarrollo de los sistemas de pilas de combustible para justificar su aplicación en los buques. Los ciclos combinados de pila de combustible tienen el potencial de lograr un consumo de combustible aún menor. El uso de sistemas combinados con componentes auxiliares de almacenamiento de electricidad, capaces de soportar importantes variaciones de carga, requiere un mayor desarrollo.

Actualmente, los sistemas de pila de combustible son una tecnología algo cara, pero se espera que los precios de los sistemas puedan reducirse a niveles en los que el coste de una mayor inversión se justifique por las ventajas. Además, actualmente la mayor parte de la producción de hidrógeno se obtiene con ayuda de combustibles fósiles. Se espera que el desarrollo de infraestructura de GNL y sistemas de pilas de combustible que utilizan gas natural pueda facilitar la introducción de combustibles gaseosos y sistemas de pilas de combustible en los buques.

### **3.1.6. Sistema Scrubber**

#### ***Beneficios***

Los buques que utilicen este tipo de sistemas pueden seguir consumiendo HFO<sup>5</sup>, un combustible más económico que, por ejemplo, el MGO, siendo la disponibilidad de HFO bastante satisfactoria. Las emisiones de carbono debidas al uso de Scrubber son menores que las del uso de combustibles más refinados, porque para producirlos, la refinería primero debe eliminar por completo los componentes de azufre mediante un proceso que tiene considerables emisiones de CO<sub>2</sub>.

El sistema Scrubber es un método para satisfacer las bajas emisiones de azufre después de la combustión del combustible. Por lo tanto, la eficiencia del sistema debe ser suficiente para alcanzar ciertos niveles de emisiones de Sox (Fagerholt y otros, 2020). La eficiencia depende del contenido de azufre en el combustible relacionado con el límite de azufre. Las eficiencias requeridas se enumeran en la Figura 20 para varios valores de contenido de azufre en el combustible en zonas ECA y no ECA.

Fuel sulphur S%	Scrubber efficiency in ECA, % Sulphur limit: 0.1%	Scrubber efficiency in non-ECA, % Sulphur limit: 0.5%
3.5	97.1	85.7
3.0	96.7	83.3
2.5	96.0	80.0
2.0	95.0	75.0
1.5	93.3	66.7
1.0	90.0	50.0

Figura 20. Eficiencia necesaria de los Depuradores SOX  
Fuente: (Chien, 2019)

Aunque la eficiencia requerida del depurador depende del área y del combustible utilizado, es suficiente limpiar los gases de escape de un combustible con un 3,5 % de azufre para satisfacer los requisitos. La información sobre los

<sup>5</sup> Los fuelóleos pesados se utilizan principalmente como combustible marino y el HFO es el combustible marino más ampliamente utilizado en la actualidad; prácticamente todos los motores diésel marinos de media y baja velocidad están diseñados para funcionar con fuelóleo pesado.

sistemas, incluida la variación en la eficiencia, debe entregarse al proveedor del depurador respectivo.

El aumento de la contrapresión influirá ligeramente en el rendimiento del motor. La cantidad de gases de escape disminuye y la temperatura de salida aumenta dependiendo de la contrapresión adicional. El SFOC (consumo específico de fueloil) aumenta en consecuencia. La Figura 21 muestra la influencia sobre estos parámetros en relación con la presión adicional máxima. En los casos en los que sólo existe una fracción de la contrapresión máxima, la influencia sobre los parámetros se reduce correspondientemente.

Power % MCR	$\Delta P$ (max) mbar	$\Delta$ SFOC g/kWh	$\Delta$ Exhaust gas % mass	$\Delta$ TC outlet °C
100	60.0	+1.0	÷7	+20
75	50.0	+1.0	÷7	+20
50	40.0	+1.0	÷10	+20
25	20.0	+1.0	÷10	+20

Figura 21. Relación entre contrapresión adicional y parámetros del motor.  
Fuente: (Chien, 2019)

La contrapresión adicional de una fregadora SOX depende del tipo de fregadora. Normalmente, se puede esperar una contrapresión de 20 a 40 mbar al 100 % de MCR (clasificación máxima continua). Dependiendo de los parámetros de rendimiento, el SFOC es de 0,3-0,7 g/kWh.

### **Desafíos**

La inversión inicial en este equipo es elevada y los costes operativos también son bastante elevados. El consumo de MGO en motores auxiliares aumenta para alimentar estos equipos, y es necesario contabilizar el consumo adicional de químicos necesarios para el proceso. En equipos híbridos y de circuito abierto es necesaria la descarga de residuos químicos.

En ciertos países existen leyes que no permiten ningún uso de este tipo de sistemas y si no se permiten las descargas portuarias, solo se pueden utilizar equipos de circuito cerrado o híbridos. Estos equipos requieren más espacio para almacenar agua dulce e, incluso en pequeñas cantidades, también generan residuos químicos. Por lo tanto, deben existir puertos que permitan la descarga de estos residuos. Uno de los aspectos que más retrasa el uso de este sistema son los requisitos de la OMI, los cuales sufrieron algunos cambios el 12 de mayo de 2015. El objetivo de estos cambios es aclarar el proceso, para poder aprobar equipos de circuito abierto. Los criterios de la OMI ahora estipulan que, durante la puesta en marcha de nuevas unidades, el pH del agua después de utilizar el Scrubber no debe ser superior a 6,5 y a una distancia de 4 metros de la descarga del barco, es decir, el espacio necesario para este tipo de equipo es genial.

Se debe revisar la ubicación correcta sin comprometer la capacidad de carga del barco ni comprometer su estabilidad. Este equipo requerirá un mantenimiento especial debido a la naturaleza de los gases de escape y su ubicación. El uso de Scrubbers no cumple con las limitaciones de NOx, por lo que es necesario instalar equipos adicionales de reducción de emisiones (EGR y SCR). El barco debe tener la opción de consumir MGO si falla el sistema Scrubber. Aún no se sabe si los actuales fabricantes de estos equipos podrán producir en términos de calidad los equipos suficientes que exige el mercado (Kim, 2017).

### **3.1.7. Reducción selectiva no catalítica (SNCR)**

#### ***Beneficios***

En la mayoría de las aplicaciones del sistema SNCR en motores, su funcionamiento se encuentra dentro de un rango de temperatura adecuado y el tiempo de funcionamiento es uno de los más eficientes. En los motores marinos, el rango de

temperatura adecuado se produce en los tubos de escape, donde el sistema funciona eficazmente. Para estas aplicaciones, el control global puede tener una eficiencia del 30% al 40% (Caterpillar, 2008).

La eficiencia de utilización del reactivo es significativamente menor con SNCR que con SCR. En los sistemas SNCR comerciales, la utilización suele estar entre el 20% y el 60%, por lo tanto, generalmente se requiere de tres a cuatro veces más reactivo con SNCR para lograr una reducción de NO<sub>x</sub> similar a los procesos SCR. El sistema SNCR normalmente logra una reducción del 30 % al 40 % en las emisiones de NO<sub>x</sub>, como ya se mencionó, con relaciones estequiométricas de 1,0 a 2,0.

El bajo coste de uso es una de sus grandes ventajas y es un sistema duradero, alargando la vida útil del propio motor. De bajo consumo energético, que oscila entre 20 y 40 kW, este tipo de sistema es fácil de actualizar ya que tiene una construcción sencilla y es de fácil acceso (Jisheng, 2018).

### ***Desafíos***

Los principales impactos operativos del SNCR incluyen incrustaciones en el precalentador de aire, contaminación por cenizas, emisiones de N<sub>2</sub>O y pequeños aumentos de temperatura. Un impacto importante en el sistema SNCR se produce en el precalentador de aire, donde el amoníaco residual reacciona con el SO<sub>3</sub> en la chimenea a través de la cual salen los gases de escape para formar sulfato y bisulfato de amonio, donde se producen adherencias y corrosión aguas abajo.

Las cenizas pueden transportar altos niveles de contaminación por amoníaco, lo cual es uno de los problemas. Se pueden formar cantidades significativas de N<sub>2</sub>O cuando el reactivo se inyecta en lugares donde el sistema SNCR está por debajo del rango de temperatura de funcionamiento óptimo. La inyección de urea tiende a producir un nivel más alto de N<sub>2</sub>O en comparación con el amoníaco.



La distribución de NH<sub>3</sub> es difícil de predecir en soluciones acuosas de NH<sub>3</sub> y urea, donde se requieren grandes cantidades de agua, lo que conduce a una pérdida de energía. La tasa de calor unitario aumenta ligeramente debido a las pérdidas de calor latente resultantes de la vaporización de los líquidos inyectados y/o al aumento de potencia requerida para los sistemas de inyección de alta energía. La eficiencia de pérdidas y la relación de potencia normalmente oscilan entre el 0,3% y el 0,8%.

### **3.1.8. Reducción Catalítica Selectiva (SCR)**

#### ***Beneficios***

La principal ventaja del SCR es la gran eliminación de NO<sub>x</sub>, lo que lo convierte en una de las principales ventajas de este sistema, con una menor cantidad de contaminación por amoníaco. La tecnología es un postratamiento muy eficiente para contrarrestar las emisiones de NO<sub>x</sub> con una eficiencia muy alta, casi el 100%. En el sistema SCR se utiliza amoníaco (NH<sub>3</sub>) o urea (NH<sub>2</sub>CONH<sub>2</sub>) como agente reductor de los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) que deben ser eliminados de los gases de escape procedentes de los motores (OMI, 2018).

Este sistema se aplica de tal manera que las concentraciones de NO<sub>x</sub> son bastante bajas, su funcionamiento se produce a una temperatura más baja en comparación con el sistema SNCR y no requiere grandes modificaciones estructurales y tecnológicas en el motor y en el propio sistema de evacuación de gases.

#### ***Desafíos***

El gran desafío de los sistemas SCR tiene que ver con el funcionamiento del catalizador, ya que este tipo de sistemas tienden a trabajar a bajas temperaturas y el proceso de adición de NH<sub>3</sub> debe ser el adecuado ya que las condiciones de carga del motor pueden variar con frecuencia. Además, el riesgo asociado con el

almacenamiento y manipulación del NH<sub>3</sub> gaseoso es significativo y, en consecuencia, no se utiliza comúnmente directamente como agente reductor; debido a razones de la naturaleza tóxica del NH<sub>3</sub> y a problemas de manipulación e incluso almacenamiento, la urea es el sustituto preferido del NH<sub>3</sub>. como agente reductor, principalmente en automóviles. El mejor procedimiento sería inyectar urea en forma de spray en el flujo de gases de evacuación incluso antes de entrar en el catalizador SCR. La urea es una sustancia química beneficiosa para el medio ambiente que hace que el proceso sea más adecuado (DNV-GL, 2018).

El NH<sub>3</sub> es corrosivo, tóxico para el medio ambiente, debe almacenarse a alta presión y para introducir NH<sub>3</sub> en los gases de escape se requiere un mecanismo de control adecuado. Una de las principales desventajas es que se trata de un catalizador que requiere más espacio para su instalación, altos costos de capital y exploración. La formación de otras emisiones y la formación de especies indeseables y la contaminación por NH<sub>3</sub> se pueden controlar instalando un catalizador de oxidación después del sistema SCR.

### **3.1.9. Exhaust Gas Recirculation (EGR)**

#### ***Beneficios***

El sistema de recirculación de gases de escape (EGR) ha sido muy popular para reducir las emisiones de NO<sub>x</sub>. La EGR implica dirigir una fracción de los gases de escape del motor al sistema de admisión, donde se mezcla con el aire fresco entrante antes de ser transportado al cilindro.

Las temperaturas máximas de combustión son uno de los principales factores para la formación de NO<sub>x</sub>, que puede reducirse considerablemente cuando se reduce la concentración de O<sub>2</sub> en la cámara de combustión. Cuando se utiliza EGR, parte del O<sub>2</sub> del cilindro se reemplaza por gases CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. Con la concentración local de

O<sub>2</sub> reducida, el combustible inyectado debe pulverizarse más ampliamente para formar una mezcla y, como consecuencia de esto, dos factores se vuelven muy prominentes.

En primer lugar, como una determinada cantidad de combustible tendrá que difundirse en un volumen más amplio para encontrar suficiente O<sub>2</sub>, algunos de los componentes del EGR, como el CO<sub>2</sub> y el vapor de agua, también estarán presentes en la mezcla. Estos constituyentes absorben la energía térmica liberada por la combustión.

El segundo factor se debe a la reducción de la disponibilidad de oxígeno. Retrasar la ignición a medida que disminuye la presencia de oxígeno extiende la combustión hasta la carrera de expansión, reduciendo la duración total de la combustión. El efecto neto de ambos factores es reducir la temperatura máxima de combustión, reduciendo así las posibilidades de formación de NO<sub>x</sub> (DNV-GL, 2020).

### ***Desafíos***

Dado que el sistema EGR reduce el oxígeno disponible en los cilindros, la formación de partículas aumenta cuando se aplica EGR. Esto ha sido tradicionalmente un problema con los motores, donde se forman NO<sub>x</sub> y otras partículas. Debido al bajo contenido de oxígeno presente en los cilindros, la combustión no se producirá de manera eficiente, por lo tanto, la formación de productos carbonosos en el sistema será inevitable, provocando corrosión y fallas prematuras en los motores.

La reducción de oxígeno que luego está disponible en el cilindro reducirá la potencia máxima disponible del motor. Por esta razón, la EGR normalmente se apaga cuando se requiere potencia máxima, por lo que el método del sistema EGR para controlar los NO<sub>x</sub> falla en esta situación.

La EGR no puede responder instantáneamente a los cambios de carga y los gases de escape tardan en fluir por el circuito de EGR. Esto hace que la calibración del comportamiento transitorio de EGR sea particularmente compleja; tradicionalmente, la válvula de EGR se cierra durante los transitorios y luego se vuelve a abrir una vez que se alcanza el estado estable. Sin embargo, el aumento de las emisiones de NOx y partículas asociado con un control deficiente del EGR hace necesario encontrar una solución para solucionar este problema (Puterman, 2018). Los gases que vuelven a la circulación normalmente se introducen en el sistema, en la admisión, antes que los cilindros. A pesar de esto, es imposible lograr una mezcla perfecta de gases en todas las velocidades del motor y cargas operativas y especialmente durante el funcionamiento transitorio. Por ejemplo, una mala distribución de EGR entre cilindros puede provocar que un cilindro reciba demasiada, lo que provoca altas emisiones de partículas, mientras que otro cilindro recibe muy poca, lo que genera altas emisiones de NOx de ese cilindro.

El gas de combustión residual que queda en el cilindro al final de la carrera de evacuación se mezcla con el gas de entrada. Por tanto, existe una proporción de EGR interna que debe tenerse en cuenta a la hora de controlar el funcionamiento. La eficiencia de la limpieza variará con la carga del motor y, en un motor equipado con sincronización de inyección variable, se debe considerar un nuevo parámetro.

### **3.1.10. Combustibles bajos en azufre**

#### **Beneficios**

Los combustibles marinos con un bajo contenido de azufre pueden alcanzar objetivos ambientales y de salud más satisfactorios a medida que se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación del aire.

El uso de este tipo de combustibles bajos en azufre permite el uso de tecnologías avanzadas para reducir los contaminantes nocivos. El uso de convertidores catalíticos y filtros de partículas se puede utilizar para eliminar prácticamente las emisiones de NOx y PM.

Estos combustibles permiten a los barcos utilizar tecnología más limpia, con dispositivos avanzados de control de emisiones, lo que se traduce en una mejora significativa de la calidad del aire. Además, muchas tecnologías de control de partículas nocivas y emisiones que agotan la capa de ozono funcionan mejor en condiciones de combustión con combustibles bajos en azufre.

### ***Desafíos***

Probablemente la principal desventaja de este tipo de combustible con menor contenido en azufre es que es mucho más caro que los combustibles actuales que se venden. En la industria productora de este tipo de combustibles se espera que los precios de las refinerías que los producen sean más caros que los combustibles convencionales en 2020, lo que podría dar motivos a los armadores para violar las normas que exigen el uso de combustibles bajos en carbono. azufre. También existe preocupación sobre si las refinerías podrán producir suficiente combustible bajo en azufre para la enorme flota mundial (Dokkum, 2016).

### 3.2. RESUMEN DE CADA SISTEMA

SISTEMA	BENEFICIOS	LIMITACIONES
<b>ALTERNATIVAS AL SISTEMA DE PROPULSIÓN</b>		
Navíos LNG	<ul style="list-style-type: none"> <li>A medida que la industria marítima está considerando alternativas al HFO, parte del mercado cambiará al gasóleo marino (MGO) o al GNL u otros combustibles alternativos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los motores que utilizan GNL pueden dañar algunos sistemas de reducción de emisiones instalados y no requieren medidas especializadas de reducción de NOx para cumplir con las emisiones de NOx del Nivel III.</li> <li>La posible falta de control de emisiones, junto con el costo del combustible significativamente mayor, hace que el GNL sea una opción atractiva para cumplir con reglas establecidas</li> <li>El sistema de propulsión de los buques de GNL implica la generación y consumo de gas de ebullición<sup>2</sup> (BOG)</li> </ul>
Navíos DUAL FUEL	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los sistemas DF se desarrollaron a partir de modificaciones técnicas basadas en motores que utilizaban HFO, debido a diferencias evidentes entre los combustibles, debido a ello tienen las mismas limitaciones de los LNG.</li> </ul>	
Navíos diésel - eléctricos	<ul style="list-style-type: none"> <li>Este tipo de sistemas se pueden utilizar en submarinos y buques de superficie.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La carga auxiliar es sólo una fracción de la carga necesaria para la propulsión, las pérdidas</li> </ul>

		<p>asociadas con la conversión eléctrica conducen a un mayor consumo de combustible en los sistemas de propulsión eléctrica.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Los equipos eléctricos también conllevan un aumento de peso, tamaño y coste.</li> </ul>
Propulsión eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aunque la reducción del consumo de combustible atribuida al uso de medios eléctricos se ve compensada por el aumento de las pérdidas eléctricas, la propulsión eléctrica ha tenido mucho éxito en la industria de los cruceros.</li> <li>• El fallo de un generador diésel casi no tiene impacto en el funcionamiento del barco.</li> <li>• La propulsión eléctrica permite flexibilidad en los espacios de máquinas, debido a la reducción de la longitud de la línea de ejes,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El funcionamiento de motores extra provoca una carga parcial y, por tanto, una menor eficiencia de las máquinas térmicas implicadas en la generación de energía y un aumento de las emisiones de NOx</li> </ul>
Propulsión con Hidrógeno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El hidrógeno (H<sub>2</sub>) se diferencia de otros combustibles en que puede producirse y utilizarse sin liberar gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub>.</li> <li>• El hidrógeno se puede obtener utilizando energía renovable y puede convertirse en un eslabón crucial en un ciclo global de energía renovable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debido a los elevados costes asociados a este tipo de sistemas, es necesario establecer estrategias para conseguir beneficios del uso de este tipo de sistemas, tanto en términos de desarrollo tecnológico como de infraestructuras de repostaje de H<sub>2</sub> para su uso a bordo</li> </ul>
<b>ALTERNATIVAS AL COMBUSTIBLE</b>		

Sistema Scrubber	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El sistema Scrubber es una tecnología de postratamiento para reducir las emisiones de SOx. Hay dos tipos de tecnología de lavado, húmedo y seco, y el principio químico es el mismo en ambos sistemas, que es el “lavado” de los gases de evacuación antes de ser liberados a la atmósfera</li> <li>• Es 98% más eficiente que otros sistemas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El Wet Scrubber no puede producir una contrapresión de combustión mayor a la establecida por el fabricante de la unidad en la que se certificaron los límites de emisión de NOx del motor.</li> <li>• Algunas instalaciones pueden requerir un recalentador para aumentar la temperatura de los gases de escape por encima del punto de rocío y/o un medio para eliminar las gotas de agua.</li> </ul>
SCR Y SNCR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La SCR es similar a la SNCR en que utiliza la inyección de amoníaco en los gases de combustión para convertir las emisiones de NOx en nitrógeno elemental y agua. La diferencia clave entre SCR y SNCR es la presencia en los sistemas SCR de un catalizador que acelera las reacciones químicas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El catalizador es necesario porque los sistemas SCR operan a temperaturas mucho más bajas en comparación con el sistema SNCR.</li> <li>• El proceso SCR O SNCR es una tecnología de control de NOx posterior a la combustión que elimina los NOx de los gases de escape</li> </ul>
Exhaust Gas Recirculation (EGR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alimenta los gases de escape al turbocompresor y los reintroduce en los cilindros. Esto reduce el contenido de oxígeno y aumenta el calor resultante de una reducción de las temperaturas máximas de combustión y por tanto se disminuye la formación de NOx.}</li> <li>• Las primeras pruebas en motores diésel marinos (MGO o HFO) que</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto coste de instalación</li> <li>• No es compatible para todos los motores</li> </ul>



	utilizan el sistema EGR mostraron un aumento de las emisiones de partículas (PM), la acidificación del aceite y una reducción del rendimiento del motor	
Combustibles bajos en ezufre	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simplifica la posibilidad de navegar en ECA ya que los barcos que usan MGO y otros que usan HFO no requieren grandes modificaciones en el motor ni modificaciones en el sistema de gases de evacuación, requiriendo únicamente poner un Scrubber.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Este tipo de combustible cuesta aproximadamente un 50% más</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

### **3.3. CASO ECUADOR**

La entrada en vigor de la nueva normativa de la OMI tendrá consecuencias económicas, operativas y financieras para todo el sector marítimo. Estas regulaciones serán mucho más restrictivas en cuanto a emisiones en las zonas de control de emisiones (ECA), para poder superar este tipo de contaminación los medios navales deberán disponer de los medios necesarios para reducir estas emisiones que provienen, fundamentalmente, de la combustión de los combustibles fósiles.

A lo largo de varios años se realizaron varias reuniones para discutir las preocupaciones que genera la contaminación por las emisiones liberadas por los barcos a la atmósfera, que provocan diversos problemas de salud, principalmente en las poblaciones ubicadas en territorios costeros.

El Convenio MARPOL añadió nueva legislación relativa a la política de emisiones de los buques, Anexo VI. Las principales funciones y contribuciones del Anexo VI son la protección del medio marino contra la contaminación causada por los buques y la necesidad de mejorar la prevención y el control de la contaminación. La mejor manera de mitigar este tipo de contaminación es el uso de tecnología que pueda reducir las emisiones contaminantes o incluso el uso de combustible que tenga menores concentraciones de constituyentes que, después de la combustión, cuando se liberan a la atmósfera, son nocivos para el medio ambiente. Uno de estos ejemplos de contaminantes liberados son los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>).

En una posible implementación de una tecnología de reducción de emisiones en Ecuador en el futuro, con el mismo requisito de reducción de emisiones expuestas por la OMI, el sistema Scrubber presenta notables ventajas, superiores a otras tecnologías. Teniendo en cuenta que la instalación de un sistema Scrubber es mucho más sencilla y con menor carga económica, no ocupando tanto espacio respecto a,

por ejemplo, el sistema de GNL que requeriría tanques de almacenamiento mucho más grandes que los que actualmente incorporan las NPO.

En definitiva, para llegar a esta conclusión fue necesario realizar un análisis energético y dimensional de los sistemas y tecnologías de propulsión con capacidad de reducir emisiones, llegando a la conclusión antes mencionada, el sistema Scrubber es el más viable para su instalación en un barco.

## CONCLUSIONES

- A partir de la revisión bibliográfica desarrollada fue posible establecer que para controlar las emisiones de SO<sub>x</sub> y PM es necesario reducir el contenido de azufre en los combustibles, ya que aumenta significativamente las emisiones. Las emisiones de SO<sub>x</sub> de los motores diésel marinos forman aerosoles de sulfato o partículas que contienen azufre, que constituyen el componente principal de las partículas. Como alternativa al uso de combustibles con bajo contenido de azufre, existen alternativas de máquina y combustible o los sistemas de reducción como los depuradores de SO<sub>x</sub>, que podrían utilizarse de forma predominante.
- En un análisis general de forma preliminar se logró encontrar que la normativa que establece las emisiones de los buques en el ECA cambiará en el futuro el consumo de combustible marítimo, así como también habrá un gran cambio en los dispositivos de control que operan a bordo de los buques. Este parámetro, fue un eje esencial para el estudio comparativo, con ello, las alternativas mencionadas en la primera conclusión están revolucionando la industria marítima, que ha enfrentado varios desafíos, desde la transición de los inicios del consumo de carbón a la locomoción, pasando por los combustibles líquidos. Aunque se están investigando nuevos tipos de combustible, todavía no se han producido grandes avances en este campo, siendo los dos únicos combustibles fósiles regulados el diésel marino (MGO) y el GNL, que por su propia composición carece de azufre.
- En una posible implementación de una tecnología de reducción de emisiones en Ecuador en el futuro, con el mismo requisito de reducción de emisiones expuestas por la OMI, el sistema Scrubber presenta notables ventajas,

superiores a otras tecnologías. Los Scrubber son el único medio de control de la contaminación que elimina tanto las partículas como los gases del escape en el mismo proceso. Estos también, están reaccionando a la nueva legislación sobre emisiones de azufre que entrará en vigor en las zonas marítimas designadas, generalmente conocidas como Áreas de Control de Emisiones (ECA), el 1 de enero de 2015. Y más adelante, en 2020 o 2025 (a la espera de una decisión de la OMI), se podría introducir un límite global del 0,5 por ciento para dichas emisiones con este sistema.

## **RECOMENDACIONES**

- Para poder continuar con el desarrollo del estudio recomendaría un estudio más detallado de las capacidades del sistema Scrubber, es decir, desarrollar un estudio de emisiones de este sistema y realizar una comparativa con otros sistemas, realizando una evaluación de costos y la implementación del sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alquimes, H. (2018). Escalas Beaufort < > Douglas. *Nautica tres cantos*.
- Altosole, M., & Figari, M. (2011). Métodos simples efectivos para el modelado numérico de motores marinos en el diseño de sistemas de control de propulsión de barcos. *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering* (págs. 129-141). DOI 10.3329/jname.v8i2.7366.
- Altosole, M., Benvenuto, G., & Campora, U. (2010). Modelado numérico de los gobernadores de motores de una planta de propulsión CODLAG. *Actas de la 10.ª Conferencia Internacional sobre Ciencias y Tecnologías Marinas, Mar Negro* (pág. 173-178). Marva, Bulgaria: ISSN: 1314-0957.
- Bakker, J., Grimmeliuss, H., & Wesselink, A. (2016). *The use of non linear models in the analysis of CPP actuator behaviour*. ICMES Conference.
- Ballou, P., Chen, H., & Horner, J. (2019). Métodos avanzados de optimización de las operaciones de los buques para reducir las emisiones perjudiciales para el cambio climático. *Oceans 2008. IEEE*, 1-12.
- Bellman, R. (s.f.). *Programación dinámica: Procesos de control adaptivo*. Princeton: Princeton Prensa Universitaria.
- Bouman, E., Lindstad, E., Rialland, A., & Strømman, A. (2017). Tecnologías de vanguardia, medidas y potencial para reducir las emisiones de GEI del transporte marítimo: una revisión. *transporte Res. Parte D Transp. Reinar*, 408-421.
- Calderón, I. (2015). *CONOCE TU BARCO AHORRA COMBUSTIBLE*. RICE propulsión: <http://www.ricepropulsion.com/TNLS/AhorroComustible.htm>
- Caterpillar. (2008). *MaK - VM43C Propulsion*. Caterpillar Motoren GmbH & Co. KG, Kiel.

- Caterpillar. (2013). *Caterpillar to acquire berg propulsion, significantly expanding customer options for advanced marine power solution.*
- Chen, H. (2021). El arte y la ciencia de la optimización de los viajes en barco: una revisión crítica. *Big Data.*
- Chen, H., Cardone, V., & Lacey, P. (2004). *Uso de la tecnología de la información de apoyo a las operaciones para aumentar la seguridad y la eficiencia de los buques, transacción anual.* Sociedad de Arquitectos Navales e Ingenieros Marinos.
- Chien, M. S. (2019). Efficient Route Planning for ECDIS with Current — 具海象資料之電子海圖上航路規劃. *Maritime Quarterly.*
- Chilig, E. (2023). *Estudio de impulsores de una bomba hidráulica de agua para que funcione como turbina: estudiar los materiales de impulsores para que una bomba hidráulica funcione como turbina.* Repositorio Digital Institucional Escuela Politécnica Nacional: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24510>
- Ching-Yeh, H., Chun-Ta, L., Ching-Pu, L., & Chiung Chih, L. (2016). Study of the Wave Effects on Propeller Performance by Computations. *Journal of Taiwan Society of Naval Architects and Marine ingenieros.*
- Chuang, Z., & Sverre, S. (2023). Pérdida de velocidad de un barco que navega en olas oblicuas. *Int. Ingeniería Oceánica.*
- Dahham, R., Wei, H., & Pan, J. (2022). Improving Thermal Efficiency of Internal Combustion Engines: Recent Progress and Remaining Challenges. *Energies*, 15(17), 6222. <https://doi.org/10.3390/en15176222>



- Department of Shipping and Marine Technology. (2019). *Reliability Analysis of Marine Structures SJO750 Division of Marine Design*. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- Dnv, G. (2018). *Evaluación de tecnologías y combustibles alternativos seleccionados*. DNV GL—Marítimo.
- DNV-GL. (2018). *Rules for classification: DNVGL-RU-SHIP-Pt4Ch2 - Rotating machinery*. DNV GL AS.
- DNV-GL. (2020). *User manual - Nauticus Torsional Vibration*. DNV GL - Digital Solutions.
- Dokkum, K. (2016). *Ship Knowledge - Ship design, construction and operation*. Dokmar Maritime Publishers B.V.
- Dowling, N. (2023). *Mechanical Behavior of Materials - Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue (4th ed)*. Pearson Education.
- Du, Y., Meng, Q., & Wang, Y. (2015). Presupuestación del consumo de combustible de un buque portacontenedores durante un viaje de ida y vuelta a través de una optimización robusta. *Transporte Res. rec.*
- Fagerholt, K., Laporte, G., & Norstad, I. (2020). Reducción de las emisiones de combustible mediante la optimización de la velocidad en las rutas de navegación. *J. Oper. Res. Soc*, 523–529.
- Feng, S., Shiriu, X., Yuan, P., & Xing, Y. (2022). The Impact of Alternative Fuels on Ship Engine Emissions and Aftertreatment Systems: A Review. *Catalysts*, 12(2), 138. <https://doi.org/10.3390/catal12020138>
- Guanzhen, L. Z. (2020). Aplicación de diferentes métodos para calcular la pérdida de buques en las olas. *º Simposio de ingeniería de construcción naval e ingeniería de turbinas de China y presentación de logros del Consejo Nacional de Ciencia.*

- Jinbo, Q., Feng, Y., & Guodong, X. (2022). Design and thermodynamics analysis of marine dual fuel low speed engine with methane reforming integrated high pressure exhaust gas recirculation system. *Fuel*, 339, 123747. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123747>
- Jisheng, W. (2018). Eliminación fotocatalítica de óxidos de nitrógeno de los gases de escape de la combustión. *Instituto de Ingeniería Química Universidad Nacional de Taiwán*. <https://ndltd.ncl.edu.tw/cgi-bin/gs32/gswweb.cgi/login?o=dnclcdr&s=id=%22106NTU05063040%22.&searchmode=basic>
- Kapusuz, M., Gurbuzb, M., & Ozcan, H. (2021). Los efectos de la actividad fotocatalítica con dióxido de titanio sobre el rendimiento y las características de emisión del motor SI. *Ingeniería Térmica Aplicada*, 188, 116600. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116600>
- Kashiwagi, M., Sugimoto, T., Ueda, T., Yamasaki, K., Arihama, K., Kimura, R., & Yamashita, A. (2004). An Analysis System for Propulsive Performance in Waves. *Int. Diario de la sociedad de arquitectos navales de Kansai*.
- Katsunori, Y., & Masamichi, I. (2020). Recent progress in environmental catalytic technology. *Catalysis Surveys from Japan*, 4, 83-90. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1019088121877>
- Kim, M. (2017). Estimación de la resistencia añadida y la pérdida de velocidad del barco en el mar. *Ocean Engineering*, 465-476.
- Kwon, Y. (2008). Pérdida de velocidad debido a la resistencia adicional en el viento y las olas. *The Naval Architect, RINA*.
- Lewis, V., & Syrmos, V. (2022). *Optimal control*. John Wiley & Sons.

- Maggos, T., Bartzis, J., & Liakpu, M. (2017). Photocatalytic degradation of NO<sub>x</sub> gases using TiO<sub>2</sub>-containing paint: A real scale study. *J. Hazard. Mater*, 146, 668–673. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.079>
- MAN Energy Solutions. (2021). *A powerful portfolio: MAN B&W two-stroke propulsion engines*.
- Martinelli, M. (2014). *Marine Propulsion Simulation*. DE GRUYTER OPEN.
- Martínez, I. (2019). *MARINE PROPULSION*. Isidoro Martínez UPM: <http://imartinez.etsiae.upm.es/~isidoro/bk3/c17/Marine%20propulsion.pdf>
- Mora, D. (2022). “*Rol de las Organizaciones Internacionales ACNUR y OIM frente a la limitada capacidad de respuesta del Estado Ecuatoriano ante la situación de vulnerabilidad de los migrantes venezolanos en Ecuador, en el contexto de pandemia COVID-19*”. Universidad Católica del Ecuador: <https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/9bafd9c1-a05f-425e-8048-871da401217d/content>
- Muhammad, S., & Fadilah, K. (2023). Dampak Aktivitas Pelabuhan Surabaya Terhadap Lingkungan dan Strategi Penanganannya. *JURNAL WILAYAH, KOTA DAN LINGKUNGAN BERKELANJUTAN*, 2(1), 13-23. <https://doi.org/10.58169/jwikal.v2i1.126>
- OMI. (2012). MEPC.1/Circ.796. OMI. *Zhang Haoqiong, Chen*.
- OMI. (2018). *Estrategia de Reducción de Emisiones de GEI de los Buques*. <http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/GHG/Pages/default.aspx>.
- OMI. (2020). *El proyecto de enmiendas al Convenio MARPOL requeriría que los barcos combinen un enfoque técnico y operativo para reducir su intensidad de carbono*. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/42-MEPC-short-term-measure.aspx>.

- OMI. (2020). *Indice de Resoluciones y Directrices MEPC relacionadas con el Anexo VI de MARPOL*. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Index-of-MEPC-Resolutions-and-Guidelines-related-to-MARPOL-Annex-VI.aspx>.
- Powell, W. (2011). *Approximate Dynamic Programming: Solving the curses of dimensionality*. John Wiley & Sons,.
- Puterman, M. (2018). *Markov decision processes: discrete stochastic dynamic programming*. John Wiley & Sons.
- Shang Chi, L. (2018). Application of CFD and Dynamic Programming for Ship Voyage Optimization. *Universidad Nacional del Océano de Taiwán*.
- Shao, W., Zhou, P., & Thong, S. (2012). Desarrollo de un nuevo método de programación dinámica hacia adelante para el enrutamiento meteorológico. *Mar. Sci. Tecnología*.
- Sold by Cat. (2020). *Berg Propulsion Returns to its Original Name*. THE MARITIME EXECUTIVE.
- Spaans, J. (1995). Nuevos desarrollos en rutas meteorológicas para barcos. 95-106.
- Sutton, R., & Barto, A. (1998). *Reinforcement learning: An introduction*. MITpress Cambridge.
- Vettor, R., & Soares, C. (2016). Desarrollo de un sistema de rutas meteorológicas para barcos. *Ing. del océano*.
- Vúlic, N., Dobrota, D., & Komar, I. (2016). *Damping and excitation in the torsional vibrations calculation of ship propulsion systems*. University Department of Professional Studies. Split, Croatia.
- Wärtsilä. (2021). *Wärtsilä Encyclopedia of marine technology*.

Wei, S., & Zhou, P. (2017). *Métodos y Algoritmos en Navegación: Desarrollo de un Método de Programación Dinámica 3D para Enrutamiento Meteorológico*. Londres: Prensa CRC.