



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Control de emisiones de NOx y SOx en buques de la Armada
Española para la navegación en zonas ECA*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Francisco Javier Navarro González

DIRECTORES: Miguel Ángel Álvarez Feijoo

Guillermo Lareo Calviño

CURSO ACADÉMICO: 2021-2022

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Control de emisiones de NOx y SOx en buques de la Armada
Española para la navegación en zonas ECA*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General / Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

El continuo crecimiento de la contaminación generada por el ser humano ha derivado en una profunda preocupación por parte de las principales organizaciones y gobiernos. El cambio climático es un problema que lleva generando polémica desde hace décadas, y para evitar consecuencias irremediables están surgiendo e implementándose normativas y convenios para regular o restringir aquellas actividades que generan dicha contaminación.

El objetivo del presente trabajo es realizar un estudio sobre tecnologías que permiten reducir las emisiones que producen los motores marinos de ciclo diésel, ya que actualmente existen zonas marítimas con control de emisiones de NO_x y SO_x que restringen la entrada de buques contaminantes. Para ello, se analizará la normativa del Convenio MARPOL que concierne a las emisiones contaminantes producidas por el uso de combustibles fósiles en los buques. Además, se realizará un estudio sobre cuáles son los sistemas actuales de reducción de emisiones más idóneos para que puedan ser instalados en buques de la Armada Española que necesiten cumplir con la normativa.

PALABRAS CLAVE

Diésel, motor, emisiones, combustible, MARPOL.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero mencionar el apoyo incondicional de mi familia en estos cinco años de mi vida ya que ha supuesto una gran motivación para poder seguir adelante. También quería mencionar a mis compañeros de promoción que han estado presentes en los buenos y malos momentos y me han ayudado a mejorar como persona. Además, mencionar a mis queridos amigos paisanos, que aunque no estuvieran físicamente, han formado parte por igual en estos intensos cinco años de carrera militar.

Por último, quiero agradecer a mis dos tutores, el Sr. Miguel Ángel Álvarez Feijoo y el Sr. Guillermo Lareo Calviño, que gracias a su experiencia como profesores me han sabido dirigir para poder finalizar este trabajo y a todas esas personas de esta escuela que han confiado en mí y me han ayudado a lo largo de estos cinco años.

CONTENIDO

1	Introducción y objetivos	7
1.1	Introducción	7
1.2	Objetivos	7
1.3	Organización de la memoria	8
2	Estado del arte	9
2.1	Normativa vigente	11
2.1.1	Convenio MARPOL	11
2.1.2	Anexo VI	12
2.1.3	Código técnico de los NO _x	17
2.1.4	Normativa a nivel Unión Europea	19
2.1.5	Normativa a nivel nacional	20
2.2	Sistemas de propulsión	21
2.2.1	Funcionamiento del motor diésel	21
2.2.2	Sistemas de propulsión de los buques de la Armada Española	26
2.2.3	Clasificación de los sistemas de propulsión	29
2.3	Combustibles marinos	34
2.3.1	Composición del petróleo	35
2.3.2	Tipos de combustibles marinos	37
2.4	Emisiones contaminantes producidas por los motores diésel	37
3	Sistemas de reducción de emisiones	42
3.1	Tratamientos para la reducción de NO _x y SO _x en el combustible	43
3.1.1	Hidrotratamientos	43
3.2	Combustibles alternativos	45
3.2.1	GNL (Gas Natural Licuado)	45
3.2.2	Biodiésel	46
3.2.3	Diésel de Fischer-Tropsch	47
3.3	Tecnologías que afectan al diseño del motor.	48
3.3.1	Inyección de agua en motores de combustión interna	48
3.3.2	Sistema EGR (Exhaust Gas Recirculation)	52
3.3.3	Sistema de inyección directa common rail	55
3.3.4	Ciclo de Miller	56
3.4	Postratamiento de gases de escape	58
3.4.1	Reducción catalítica selectiva (SCR)	58
3.4.2	Catalizadores de tres vías	62

3.4.3 Almacenamiento y reducción de NO _x (NSR)	63
3.4.4 Scrubbers (Técnica de limpieza de gases de escape).....	64
4 Propuestas de control de emisiones	68
4.1.1 Emisiones de SO _x	68
4.1.2 Emisiones de NO _x	71
5 Conclusiones y líneas futuras	84
5.1 Conclusiones	84
5.2 Líneas futuras	84
6 Bibliografía.....	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Esquema del desarrollo del TFG (Autoría propia)	8
Figura 2-1 Cuotas modales del transporte de mercancías en ámbito internacional [4].....	10
Figura 2-2 Comparación eficiencias térmicas entre distintos motores y generadores [5].....	10
Figura 2-3 Lista de anexos del Convenio MARPOL (Autoría propia)	12
Figura 2-4 Niveles de restricción sobre las emisiones de NO _x [34]	15
Figura 2-5 Límites de emisiones de SO _x [14].....	16
Figura 2-6 Zonas de control de emisiones actuales y posibles ECA's en el futuro [15]	17
Figura 2-7 Diagrama teórico de trabajo de un ciclo diésel [20]	21
Figura 2-8 Diagrama práctico de trabajo [22]	22
Figura 2-9 Esquema de funcionamiento de un motor diésel de 4T [23]	23
Figura 2-10 Esquema de funcionamiento de un motor diésel de 2T [38]	24
Figura 2-11 Esquema de un motor con sobrealimentación [24].....	25
Figura 2-12 Esquema de funcionamiento de un turbocompresor [24]	25
Figura 2-13 Clasificación de la flota española según el Anexo VI (Autoría propia)	27
Figura 2-14 Lámina Lista oficial de buques de la Armada Española [26]	28
Figura 2-15 Sistemas de propulsión de algunos buques (Autoría propia).....	28
Figura 2-16 Esquema de un sistema de propulsión COSAG [27].....	30
Figura 2-17 Esquema de un sistema de COGAS turbo eléctrico [27].....	30
Figura 2-18 Esquema de un sistema de propulsión CODAD [27]	31
Figura 2-19 Esquema de un sistema CODOG [27]	31
Figura 2-20 Esquema de un sistema CODAG [27]	32
Figura 2-21 Esquema de sistema de propulsión COGOG [27]	32
Figura 2-22 Esquema de un sistema de propulsión CODLAG [27].....	33
Figura 2-23 Esquema de un sistema de propulsión COGAG [27]	34
Figura 2-24 Esquema sobre la destilación fraccionada (Autoría propia)	34
Figura 2-25 Porcentaje aproximado de cada componente que se obtiene del petróleo [30]	35
Figura 2-26 Emisiones típicas de un motor MAN B & W diésel lento [34].....	38
Figura 2-27 Mapa mundial de emisiones en un escenario sin Convenio MARPOL [40].....	40
Figura 2-28 Mapa mundial de emisiones en un escenario con Convenio MARPOL [40].....	40
Figura 2-29 Resumen de las fuentes de emisiones (Autoría propia).....	41
Figura 3-1 Esquema resumen sobre los distintos sistemas (Autoría propia)	43
Figura 3-2 Esquema de la refinería peruana "La Pampilla" [42]	44
Figura 3-3 Gráfica comparativa de emisiones entre combustible diésel y GNL [45]	46

Figura 3-4 Esquema de las principales etapas de producción de biodiésel [48]	47
Figura 3-5 Motor de seis cilindros con tecnología M TwinPower Turbo [53]	48
Figura 3-6 Esquema de adición de agua al aire de admisión [32].....	49
Figura 3-7 Esquema del método de inyección de agua directa en el cilindro [18]	49
Figura 3-8 Esquema de un sistema de humidificación del aire de carga [57].....	51
Figura 3-9 Esquema de sistema EGR [59]	52
Figura 3-10 Tipos de EGR (Autoría propia)	53
Figura 3-11 Esquema sobre sistema EGR de alta presión y baja presión [61].....	54
Figura 3-12 Reducción de emisiones de NO _x con el sistema de common rail [64]	55
Figura 3-13 Esquema de un sistema de inyección common rail de un turismo [65].....	55
Figura 3-14 Cierre adelantado de la válvula de un motor ciclo Miller [66].....	57
Figura 3-15 Motor Sulzer 16ZA40S con ciclo Miller [67]	57
Figura 3-16 Principio de funcionamiento del sistema SCR [71].....	58
Figura 3-17 Esquema de un sistema de reducción catalítica con AdBlue [73].....	59
Figura 3-18 Imagen del depósito de AdBlue de un automóvil con motor diésel [69]	60
Figura 3-19 Esquema de un sistema SCR implantado en un buque [75]	61
Figura 3-20 Canales del elemento catalítico del SCR [71]	62
Figura 3-21 Catalizador de tres vías [79]	63
Figura 3-22 Esquema de las reacciones que ocurren en un sistema combinado NSR-SCR [81].....	63
Figura 3-23 Esquema de un scrubber [83]	64
Figura 3-24 Resumen sobre los distintos sistemas (Autoría propia).....	66
Figura 3-25 Resumen sobre los distintos sistemas (Autoría propia).....	66
Figura 3-26 Resumen sobre los distintos sistemas (Autoría propia).....	67
Figura 4-1 Imagen de buques de la Armada realizando petróleo en la mar (FAS) [101]	69
Figura 4-2 Motor Wärtsilä 38 [89]	72
Figura 4-3 Esquema del método de inyección de agua elegido [103].....	81
Figura 4-4 Esquema de la culata con los inyectores de agua [104].....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Niveles de control de emisiones de NO _x [13]	14
Tabla 2-2 Valores equivalentes para buques con métodos de reducción de SO _x [17]	20
Tabla 2-3 Contenido en azufre de algunos crudos [31].....	36
Tabla 2-4 Contenido en nitrógeno y azufre de algunos crudos [31]	37
Tabla 4-1 Límites de emisiones de NO _x para los buques BAM [88]	71
Tabla 4-2 Comparación de emisiones de NO _x del BAM “Furor” [88].....	73
Tabla 4-3 Cuadro de precio descompuesto por cada componente del sistema SCR [91].....	73
Tabla 4-4 Variación de la potencia de freno (kW) [92]	76
Tabla 4-5 Variación del consumo específico (kg/kW·hora) [92].....	76
Tabla 4-6 Variación de la eficiencia térmica (%) [92]	77
Tabla 4-7 Emisiones de NO _x (ppm) [92]	78
Tabla 4-8 Tabla comparativa entre distintos momentos de inyección de agua y ratio	79
Tabla 4-9 Consumo de los motores diésel de un BAM.....	82
Tabla 4-10 Comparación económica entre motor con sistema DWI y sin DWI.....	82
Tabla 4-11 Consumo estimado de agua usando DWI	83
Tabla 4-12 Estimación de agua restante no destinada a DWI.....	83

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Evolución del precio del combustible DFM F76 según la fuente de obtención70

Gráfico 2 Evolución histórica del gasóleo B.....70

Gráfico 3 Variación de la potencia de freno (kW) [91].....75

Gráfico 4 Variación del consumo específico (kg/kW·hora) [91]76

Gráfico 5 Variación de la eficiencia térmica (%) [91]77

Gráfico 6 Emisiones de NO_x (ppm) [91]78

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El mundo actual se encuentra en una situación en la que la conciencia sobre el cambio climático tiene más cabida. Esto ha provocado que todos los sectores tales como la industria, el ámbito marítimo y el sector transporte en general tengan que restringir su actividad en cuanto a la contaminación relacionada con su actividad. Esto es debido a que organizaciones tales como la Organización Marítima Internacional llevan a cabo constantes cambios sobre las normativas de control de la contaminación con el objetivo de reducir al máximo la contaminación producida por buques y su actividad. El Convenio MARPOL (MARitime POLLution) se acordó en la década de los 70, y ha sufrido numerosas modificaciones que han conducido a restricciones mucho más severas. A partir de ese momento, empresas dedicadas al ámbito marítimo han intentado buscar de la manera más económica y eficaz posible cumplir con las directivas que las distintas organizaciones les han ido implantando.

Principalmente, el buque debido a su actividad crea distintos tipos de contaminación y para cada una de ellas existen restricciones. Sin embargo, el presente trabajo se enfocará en la contaminación atmosférica que producen los motores de combustión alternativos que poseen los buques para su propia propulsión o para la generación de electricidad a bordo.

1.2 Objetivos

El principal objetivo del presente trabajo es investigar sobre las distintas tecnologías que han sido desarrolladas por empresas y diversos estudios para reducir las emisiones y estudiar la posibilidad de trasladar todos esos sistemas a los distintos buques de la Armada Española que necesiten o que puedan necesitar en un futuro para cumplir con la normativa.

1.3 Organización de la memoria

Para poder entender de una mejor manera como se encuentra organizada la memoria, se procede a explicar de una manera breve y concisa los distintos apartados de la misma:

- **Introducción y objetivos:** se comienza el presente trabajo dando una explicación que justifica la realización de este trabajo y la importancia que genera el tema principal que enfoca el trabajo en su totalidad. Además, se explica la forma en la que transcurre el trabajo para mejorar el entendimiento del lector.
- **Estado del arte:** en este apartado se inicia mencionando la importancia que posee actualmente el motor diésel en el ámbito marítimo, se continua estudiando la normativa vigente enfocada a las emisiones contaminantes, los distintos modos de configuración de la planta propulsora de los buques y como se implanta el motor diésel en éstos, el funcionamiento del motor diésel, los distintos combustibles utilizados para la propulsión de los buques y la composición típica de los gases de escape que generan los motores diésel.
- **Sistema de reducción de emisiones:** se realiza un estudio nutrido por diversas fuentes bibliográficas sobre las tecnologías que pueden ser aplicadas a los motores diésel para reducir las emisiones de óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno.
- **Propuestas para el control de emisiones:** tras concluir con el estudio sobre cómo se pueden reducir las emisiones contaminantes, se procede a analizar si la Armada Española cumple con la normativa actual sobre emisiones contaminantes de los motores diésel y se dan propuestas sobre como se podrían instalar los sistemas que resultarían más idóneos para los buques de la Armada Española.



Figura 1-1 Esquema del desarrollo del TFG (Autoría propia)

2 ESTADO DEL ARTE

El mundo actual posee un ritmo que conlleva una serie de consecuencias. La actividad del ser humano necesita de una serie de elementos principales para impulsar su actividad económica, como por ejemplo el transporte y la industria. Uno de estos elementos principales son los ampliamente conocidos como combustibles fósiles. Según el estudio realizado por el Departamento de Economía y Finanzas de la Universidad de Guanajuato en México, existe una relación siempre positiva entre crecimiento económico, consumo de energía y emisiones de CO₂ [1]. El uso de estos combustibles conlleva una serie de efectos perjudiciales para los seres humanos y el medioambiente ya que las máquinas que los usan expulsan emisiones contaminantes.

Una de las actividades económicas que impulsan más el crecimiento es el transporte. Es un sector estratégico básico para el desarrollo global de la economía ya que fundamentalmente responde a la libre circulación de mercancías y constituye una herramienta básica para incrementar la productividad de los sectores productivos. Existen múltiples vías de transporte como el ferrocarril o por carretera, pero el transporte marítimo es, por su capacidad y eficiencia, el medio de transporte empleado con mayor frecuencia en el tráfico internacional de mercancías. Su carácter internacional viene dado por su propia naturaleza, ya que se perfila como el medio idóneo para transportar grandes volúmenes de mercancías entre puntos geográficamente distantes y sin posible conexión terrestre [2]. Es eficiente desde el punto de vista energético, por lo que se refiere a la relación entre el volumen de carga transportada y a las respectivas emisiones por tonelada de mercancías transportadas y por kilómetro recorrido [3].

El transporte de mercancías en el ámbito internacional juega un papel preponderante en el transporte internacional de mercancías, incrementando su cuota año tras año hasta alcanzar en 2019 una participación del 79,3% sobre el volumen total de toneladas transportadas en dicho ámbito. El transporte de viajeros representa una cuota muy reducida frente a otros tipos de transporte como el automóvil o el aéreo [4].

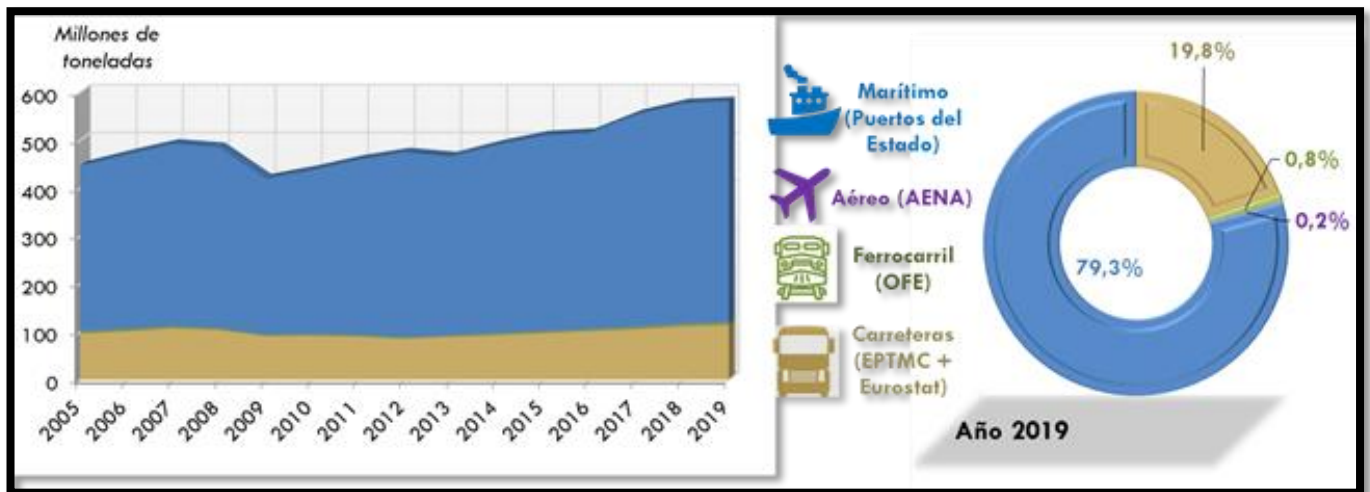


Figura 2-1 Cuotas modales del transporte de mercancías en ámbito internacional [4]

El aumento del tráfico global marítimo y la apertura de nuevas líneas de transporte con países emergentes y nuevas potencias como China, India, Brasil y el Sureste asiático, así como la existencia de múltiples líneas de transporte marítimo a corta distancia por las zonas del Norte de Europa, han provocado un aumento de las emisiones de agentes contaminantes a la atmósfera. El transporte marítimo de mercancías usa principalmente en sus buques el motor diésel o también conocidos como motores de encendido por compresión (MEC) debido a su fiabilidad y consumo ya que carecen de sistema de encendido y giran a menos revoluciones que los motores de gasolina o también conocidos como motores de encendido provocado (MEP), por lo que resulta más idóneo para acoplar directamente el eje de la hélice sin necesidad de reductora en muchos casos. Además, el motor diésel posee un mayor rendimiento térmico que el motor de gasolina, ya que la relación de compresión en los motores diésel es mucho mayor que en los motores que trabajan con ciclo Otto [5]. Se produce un menor desgaste de todas las piezas por utilizar un régimen de revoluciones menor, por lo que la vida útil de un motor diésel es mucho mayor. Además, el propio combustible que utilizan los motores diésel es más eficiente energéticamente [6].

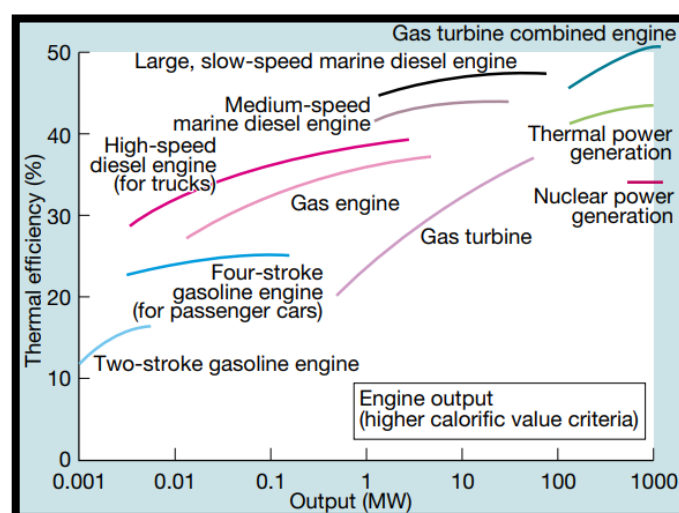


Figura 2-2 Comparación eficiencias térmicas entre distintos motores y generadores [5]

Si se comparan un motor diésel y otro de gasolina con características equivalentes, el consumo del motor gasolina es mayor, por lo tanto, éste expulsará más cantidad de emisiones de CO₂. Aunque la

cantidad de emisiones de CO₂ de un motor gasolina es mayor que un motor diésel, éste desprende otros componentes perjudiciales para el medio ambiente y los seres vivos.

En la década de los 70 del siglo pasado surge en Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, que versa sobre la prevención de la contaminación del medio marino por los buques a causa de factores de funcionamiento o accidentales [7]. A lo largo de los años, el Convenio MARPOL ha sido objeto de diversas actualizaciones mediante la incorporación de enmiendas en base a dos principales factores: la evolución de las tecnologías en el sector marítimo y el cambio climático.

A continuación, se explicará la normativa vigente que afecta a los sistemas de propulsión en cuanto a emisiones contaminantes producidas por el uso de combustibles fósiles y como afecta a la Armada Española.

2.1 Normativa vigente

2.1.1 Convenio MARPOL

Para empezar sobre la normativa vigente hay que comenzar hablando sobre el convenio MARPOL, el convenio que surgió gracias a la Organización Marítima Internacional, un órgano especializado de la Organización de Naciones Unidas debido al aumento considerable de la demanda de hidrocarburos y el tráfico marítimo mundial además de otros acontecimientos importantes que impulsaron el índice de construcción de buques como pueden ser las guerras mundiales. La Conferencia Internacional sobre contaminación del mar, 1973, convocada por la OMI, aprobó el Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques. El Convenio se modificó ulteriormente mediante el Protocolo de 1978 dando como resultado “Convenio internacional para prevenir la contaminación de buques, 1973, modificado por el Protocolo de 1978” o, de manera abreviada, “MARPOL 73/78”. Este Convenio al que están suscritos unos 140 países, es de aplicación para al menos un 97% de los buques que navegan por todo el globo y en él se recogen diversas normas aplicables a los desechos generados por los buques como consecuencia de su actividad. Sin embargo, los buques de guerra están exentos de cumplir normativas del Convenio MARPOL, pero con una gestión ambiental eficaz se evitarán accidentes ambientales y se evitarán noticias negativas en los medios de comunicación que perjudiquen la imagen de la Armada. Además, la sociedad se sentirá más cercana a una Armada firmemente comprometida con el Medio Ambiente [8].

El Convenio MARPOL está integrado por seis anexos que aparecen en la Figura 2-3, cuyo contenido son reglas que abarcan las diversas fuentes de contaminación por los buques. En el siguiente gráfico se enumeran los distintos anexos y sus correspondientes aplicaciones.

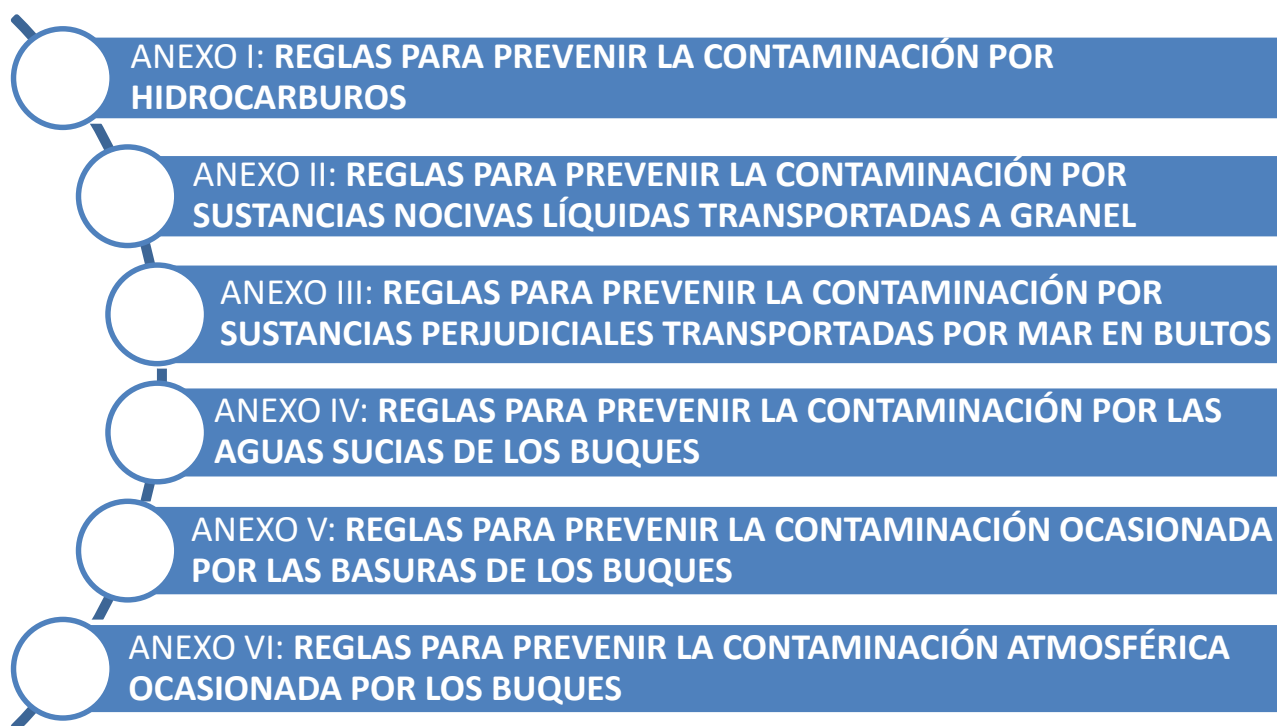


Figura 2-3 Lista de anexos del Convenio MARPOL (Autoría propia)

2.1.2 Anexo VI

En concreto, el Anexo VI, que fue adoptado por la OMI en 1997, pero no entró en vigor en mayo de 2005, está constituido por reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques y establece los límites de las emisiones de óxidos de azufre y de óxidos de nitrógeno de los escapes de los buques, prohibiéndose así las emisiones deliberadas de sustancias que agotan la capa de ozono. Posteriormente, en octubre de 2008, la OMI aprobó una Resolución para modificar el anexo VI siendo aprobado por 55 países, que representaban el 82% del registro bruto de la flota mundial. El anexo VI ha sido revisado múltiples veces mediante la entrada en vigor de enmiendas. En los siguientes apartados se hace referencia a las sustancias perjudiciales para la atmósfera que aparecen en el Capítulo 3 del presente anexo:

- Regla 12: sustancias que agotan la capa de ozono.
- Regla 13: óxidos de nitrógeno.
- Regla 14: óxidos de azufre.

Es importante denotar que las reglas 13 y 14 sólo aplican a motores diésel instalados en buques tanto para propulsión como diésel generadores. Por lo tanto, las turbinas de gas marinas quedan excluidas debido al coeficiente de exceso de aire aplicado durante su funcionamiento con el fin de controlar la temperatura de los productos de combustión [9].

2.1.2.1 Regulación sobre las emisiones de sustancias que agotan la capa de ozono (SAO)

Las sustancias que reducen la capa de ozono son aquellas sustancias controladas definidas en el párrafo 4 del artículo 1 del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono de 1987. El Protocolo de Montreal (del Convenio de Viena para la protección de la capa de ozono) es un acuerdo mundial para proteger la capa de ozono de la estratosfera terrestre reduciendo gradualmente las sustancias químicas que la agotan [10]. Esta reducción gradual incluye tanto la producción como el consumo de sustancias que agotan la capa de ozono (SAO). Dado que las SAO también son potentes

gases de efecto invernadero, la reducción gradual también es fundamental para mitigar el cambio climático. Además, a pesar del hecho de que los hidrofluorocarbonos (HFC) no agotan la capa de ozono, el Protocolo pretende reducir gradualmente su producción y su consumo para impedir que las SAO sean sustituidas por los HFC, que contribuyen de forma significativa al cambio climático. Las emisiones procedentes de los HFC se abordan en el Acuerdo de París.

El Acuerdo de París es un tratado internacional sobre el cambio climático jurídicamente vinculante, es decir, supone obligatoriedad para los países adscritos al acuerdo [11]. Su objetivo es limitar el calentamiento mundial a muy por debajo de 2, preferiblemente a 1,5°C, en comparación con los niveles preindustriales. Por lo tanto, según la Resolución del Parlamento Europeo, de 27 de abril de 2021, sobre medidas técnicas y operativas para un transporte marítimo más eficiente y limpio, se necesita que los países y Estados tengan en cuenta la estrategia inicial de la OMI sobre la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de los buques para garantizar que se adopten medidas concretas para trazar una vía ambiciosa y realista hacia un transporte marítimo sin emisiones, que sea coherente con el objetivo de temperatura del Acuerdo de París.

Dentro de las SAO se pueden destacar las siguientes sustancias que agotan la capa de ozono: los clorofluorocarbonos, hidroclorofluorocarbonos, los halones, los hidrobromofluorocarbonos, el tetracloruro de carbono y el bromuro de metilo [12]. A bordo de los buques puede haber, sin que esta lista sea exhaustiva, las siguientes sustancias que agotan la capa de ozono:

- Halón 1211: bromoclorodifluorometano.
- Halón 1301: bromotrifluorometano.
- Halón 2402: 1,2-dibromo-1, 1, 2, 2-tetrafluoroetano (también denominado Halón 114B2).
- CFC-11: triclorofluorometano.
- CFC-12: diclorodifluorometano.
- CFC-113: 1, 1, 2-tricloro-1, 2, 2-trifluoroetano.
- CFC-114: 1,2-dicloro-1, 1, 2, 2-tetrafluoroetano.
- CFC-115: cloropentafluoroetano.

El reglamento prohíbe toda emisión deliberada de sustancias que agotan la capa de ozono. Las emisiones deliberadas incluyen las que se producen durante el mantenimiento, la revisión, la reparación o el arrumbamiento de sistemas o equipo, excepto la liberación de cantidades mínimas durante la recuperación o el reciclaje de una sustancia que agota la capa de ozono. Se prohibirán las instalaciones que contengan sustancias que agotan la capa de ozono que no sean hidroclorofluorocarbonos:

- En los buques construidos el 19 de mayo de 2005 o posteriormente.
- En los buques construidos antes del 19 de mayo de 2005, si la fecha contractual de entrega del equipo al buque es el 19 de mayo de 2005 o posteriormente, o en ausencia de una fecha contractual de entrega, si el equipo se entrega de hecho al buque el 19 de mayo de 2005 o posteriormente.

Se prohibirán las instalaciones que contengan hidrofluorocarbonos:

- En los buques construidos el 1 de enero de 2020 o posteriormente.
- En los buques construidos antes del 1 de enero de 2020, si la fecha contractual de entrega del equipo al buque es el 1 de enero de 2020 o posteriormente, o en ausencia de una fecha contractual de entrega, si el equipo se entrega al buque el 1 de enero de 2020 o posteriormente [13].

2.1.2.2 Regulación sobre las emisiones de óxidos de nitrógeno

El reglamento dictamina una serie de directrices para aplicar dependiendo de una serie de factores. Este se aplicará a los motores diésel que cumplan las siguientes premisas:

- Motores que desarrollen una potencia de salida superior a 130 kW, instalados a bordo de buques construidos más tarde del 1 de enero de 2000.

- Motores diésel con potencia mayor de 130 kW instalados a bordo de buques que hayan sufrido una gran conversión posterior al 1 de enero de 2000 refiriéndose a cambios en el motor principal tales el propio cambio del motor o por ejemplo un cambio de levas o del sistema de inyección del combustible.

- Motores diésel con potencia mayor de 5000 kW instalados a bordo de buques construidos más tarde del 1 de enero de 1990 y antes del 1 de enero de 2000.

Esta regulación no aplica a:

- Motores diésel de emergencia, motores instalados en botes salvavidas o de cualquier equipo destinado a ser utilizado únicamente en el caso de emergencia.

- Motores utilizados únicamente para conducir la maquinaria dedicada a la exploración, explotación de recursos minerales en alta mar [13].

El reglamento prohíbe el funcionamiento de todo motor diésel al que se aplique la presente regla, a menos que la emisión de óxidos de nitrógeno (calculada en forma de emisión total ponderada de NO_2) del motor se encuentre dentro de los diferentes niveles de control basados en la fecha de construcción del barco. Cada nivel se establece según a fecha de construcción del barco:

- Si el buque fue construido el 1 de enero de 2000 o posteriormente y antes del 1 de enero de 2011, se le aplica el nivel I.
- Si el buque fue construido el 1 de enero de 2011 o posteriormente, se le aplica el nivel II.
- Si el buque fue construido el 1 de enero de 2016 o posteriormente, se le aplica el nivel III.

El valor límite real se determina a partir de la velocidad nominal del motor:

Nivel	Fecha de construcción del buque	Valor límite de emisión ponderada total del ciclo (g/kWh)		
		$n < 130$	$130 < n < 2000$	$n \geq 2000$
1	01/01/2000	17,0	$45 \times n^{(-0,2)}$	9,8
2	01/01/2011	14,4	$44 \times n^{(-0,23)}$	7,7
3	01/01/2016	3,4	$9 \times n^{(-0,2)}$	2,0

Tabla 2-1 Niveles de control de emisiones de NO_x [13]

Donde n es el régimen nominal del motor (rpm = revoluciones por minutos).

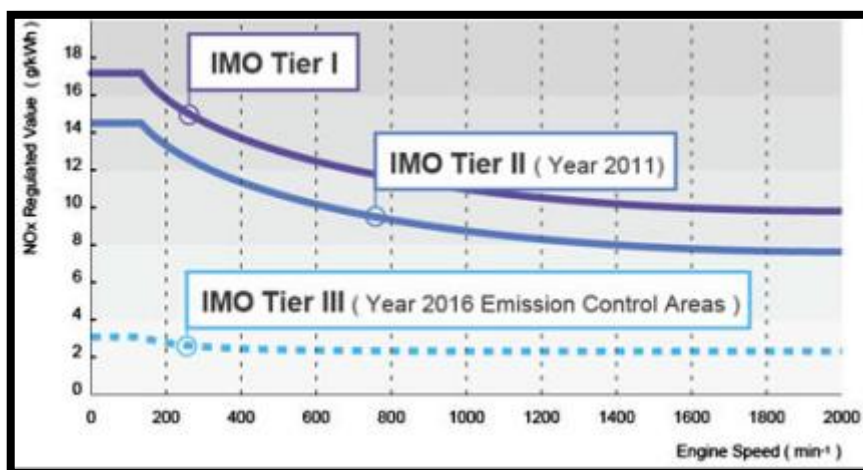


Figura 2-4 Niveles de restricción sobre las emisiones de NO_x [34]

Los buques construidos con motores diésel marinos instalados el 1 de enero de 2016 o posteriormente están sujetos a las normas de nivel III cuando éstos se encuentren operando en una zona de control de emisiones designada. Por otra parte, si se encuentran operando fuera de una zona de control de emisiones estarán sujetos a los límites de emisión de nivel II.

Estas emisiones de los motores diésel se logran a través de los requisitos de inspección y certificación que conducen a la emisión de un certificado EIAPP y la posterior demostración del cumplimiento en servicio de acuerdo con los requisitos de las reglamentaciones obligatorias en la regla 13, y en el Código Técnico de NO_x. Cuando se use combustible compuesto por mezclas de hidrocarburos derivado del refinado de petróleo, los procedimientos de ensayo y los métodos de medición se ajustarán a lo dispuesto en el Código Técnico sobre los NO_x.

Sin embargo, se permite el funcionamiento de un motor diésel si:

- i. El motor consta de un sistema de limpieza de los gases de escape, aprobado por la Administración de conformidad con lo dispuesto en el Código Técnico sobre los NO_x, destinado a reducir las emisiones de NO_x del buque a los límites especificados en el anterior apartado.
- ii. El motor utiliza otro sistema equivalente, aprobado por la Administración teniendo en cuenta las directrices que elabore la Organización, con objeto de reducir las emisiones de NO_x del buque a los límites especificados como mínimo.

2.1.2.3 Regulación sobre los óxidos de azufre

La OMI señala que los controles de las emisiones de SO_x se aplican a los equipos y los dispositivos de combustión de todo tipo de fueloil instalados a bordo y, por tanto, incluyen tanto a los motores principales como a los auxiliares, así como a elementos tales como calderas y generadores de gas inerte. El objetivo principal de las directrices es establecer un método convenido para vigilar el contenido medio de azufre del fueloil residual suministrado para uso a bordo de los buques. Según el reglamento el contenido de azufre de todo fueloil utilizado a bordo de los buques no excederá del 0,5% masa/masa. El 1 de enero de 2015 entró en vigor el requisito del Anexo VI del MARPOL que limita al 0,1% el contenido máximo de azufre de los combustibles marinos en las zonas de control de emisiones de azufre (SECA's).

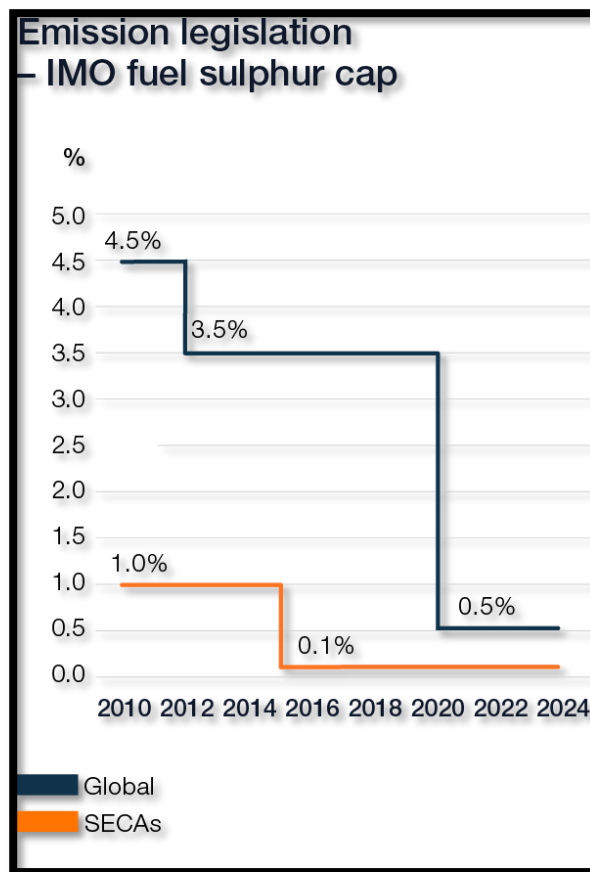


Figura 2-5 Límites de emisiones de SO_x [14]

En la Figura 2-5 se puede apreciar la evolución temporal de los límites de azufre dentro y fuera de las Áreas de Control de Emisiones (ECA's) y señalan la reducción progresiva del contenido máximo de azufre (SO_x) del combustible [14].

Cuando los buques se encuentren dentro de una zona de control de las emisiones de SO_x, cumplirán al menos una de las siguientes condiciones:

- El contenido del azufre del fueloil que se utiliza a bordo de los buques en una zona de control de las emisiones de SO_x no excede del 1,5% masa/masa.
- Se utiliza un sistema de limpieza de los gases de escape, aprobado por la Administración teniendo en cuenta las directrices que elabore la Organización, para reducir la cantidad total de las emisiones de óxidos de azufre del buque, incluidas las de los motores propulsores principales y auxiliares, a 6,9 g de SO_x/kW h o menos, calculada en forma de emisión total ponderada de dióxido de azufre. Los flujos de desechos procedentes de la utilización de dicho equipo no se descargarán en puertos cerrados ni en estuarios, a menos que se pueda demostrar de forma detallada con documentos que tales flujos de desechos no tienen un efecto negativo en los ecosistemas de esos puertos y estuarios, basándose en los criterios notificados por las autoridades del Estado rector del puerto a la Organización.

2.1.2.4 Zonas de control de emisiones

En la actualidad hay establecidas 4 Zonas de Emisiones Controladas (Mar Báltico, Mar del Norte, Norte América, y Mar del Caribe de Estados Unidos. Además, cada ECA puede ser SECA (Sulphur Emission Control Area) en la que sólo limita el contenido de azufre de los combustibles utilizados por los buques que transitan en ellas, también puede ser NECA (NO_x Emission Control Area) en la que se hace de obligado cumplimiento para los motores de los buques construidos a partir de 2016 que vayan

a navegar por ellas cumplir con el Tier III en cuanto a emisiones de NO_x. En las ECA's también pueden ser de control de materia particulada, aunque no hay unos límites establecidos.

Como se puede ver en la Figura 2-6 en las zonas marcadas en rojo existen restricciones para los buques y las marcadas en amarillo son posibles futuras zonas de control [15]. El Mar Mediterráneo podría ser una nueva zona por lo que influirá notablemente en los buques que enarbolan la bandera española. La finalidad de las zonas de control de las emisiones es prevenir, reducir y controlar la contaminación atmosférica ocasionada por las emisiones de los buques y sus consiguientes efectos negativos en zonas marítimas y terrestres.

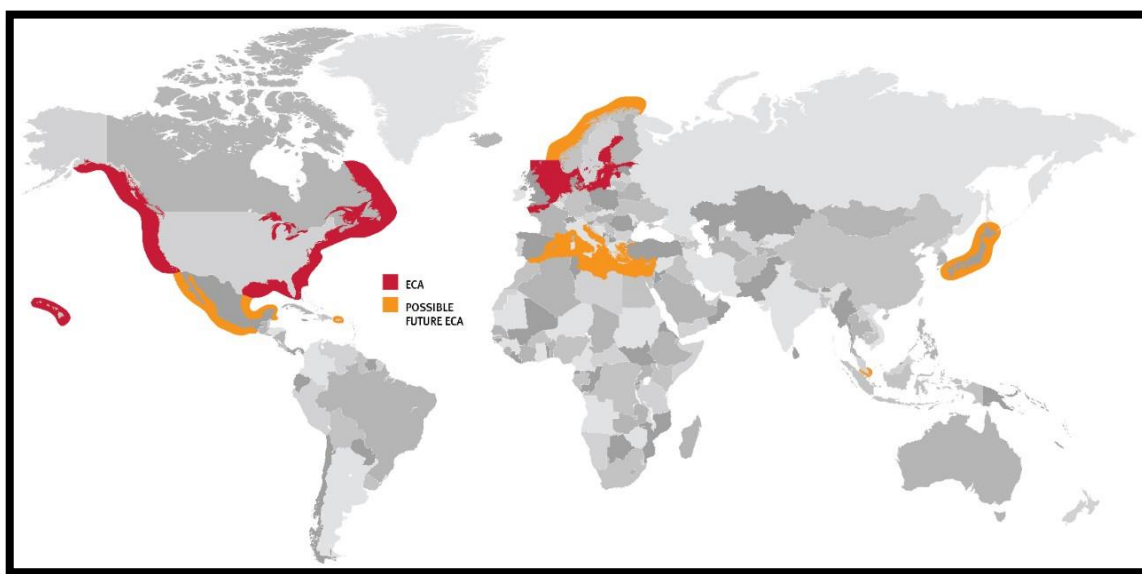


Figura 2-6 Zonas de control de emisiones actuales y posibles ECA's en el futuro [15]

La OMI considerará el establecimiento de una zona especial de control de las emisiones cuando se demuestre que es necesario prevenir, reducir y controlar la contaminación atmosférica ocasionada por las emisiones de los buques. Estas zonas podrán ser propuestas por los Estados Contratantes del Protocolo de 1997 (en el cual se introdujeron las enmiendas en el Convenio y se añadió el Anexo VI, que entró en vigor en 2005) que requerirá una evaluación que demuestre que las emisiones contribuyen a la contaminación atmosférica y su impacto sobre la salud por esta sustancia.

2.1.3 Código técnico de los NO_x

A partir de la entrada en vigor del Anexo VI del Convenio MARPOL, todos los motores diésel marinos a los que se aplique la regla 13 de ese anexo han de ajustarse a lo dispuesto en el presente código. Finalmente, en 2005, se convino que el Anexo VI y el Código Técnico sobre los NO_x fueran objeto de una revisión que se concluyó finalmente en 2008.

Como información de carácter general cabe señalar que los precursores de la formación de óxidos de nitrógeno durante el proceso de combustión son el nitrógeno y el oxígeno que representan el 99% del aire que entra en el motor. Durante, la combustión, el nitrógeno no experimenta en general ninguna reacción, aunque una pequeña proporción del mismo se oxida formando distintos óxidos de nitrógeno (NO_x). La cuantía de éstos depende de la temperatura de la llama o combustión y de la cantidad de nitrógeno orgánico procedente del combustible. La formación de NO_x también es función del tiempo durante el cual el nitrógeno y el oxígeno sobrante estén expuestos a las altas temperaturas que produce la combustión en el motor diésel.

El Código Técnico tiene objeto por brindar procedimientos obligatorios de prueba, reconocimiento y certificación de los motores diésel marinos que permitan a los fabricantes de motores,

propietarios de buques y administraciones tener la seguridad de que todos los motores diésel marinos a los que se apliquen se ajustan a los límites de emisión de NO_x que se especifican en el Anexo VI.

La Organización además recomienda a las Administraciones que comprueben las emisiones diésel marinos de propulsión y auxiliares en un banco de pruebas en el que puedan realizarse ensayos precisos en condiciones debidamente controladas. La determinación en esta fase inicial del cumplimiento de las prescripciones de la regla 13 del Anexo VI es una de las características esenciales del presente código. Toda prueba posterior que se realice a bordo del buque sería inevitablemente limitada en amplitud y precisión y el objetivo de la misma será inferir o deducir el comportamiento del motor en cuanto a las emisiones y confirmar que dicho motor se ha instalado y se utiliza y mantiene de acuerdo con las especificaciones del fabricante y que los eventuales ajustes o modificaciones no afectan a las características de emisión del motor establecidas por las pruebas iniciales y el certificado expedido por el fabricante.

El Código Técnico se aplica a todos los motores diésel marinos de potencia de salida superior a 130 kW instalados, o proyectados y destinados a ser instalados, a bordo de cualquier regido por el Anexo VI al que se aplique la regla 13.

De manera general, todo motor diésel marino que cumplan las condiciones anteriormente mencionadas será objeto de los siguientes reconocimientos:

- Un reconocimiento de certificación previa que garantice que el motor, conforme su proyecto y equipo, se ajusta al límite aplicable de emisión de NO_x indicado en la regla 13. Si se ajusta a dichos límites, la Administración expedirá un Certificado EIAPP (Certificado Internacional de prevención de la contaminación atmosférica para motores).
- Un reconocimiento inicial de certificación que se realizará a bordo del buque después de instalar el motor pero antes de que éste entre en servicio.
- Reconocimientos intermedios, anuales y de renovación a fin de garantizar que el motor sigue cumpliendo plenamente las prescripciones del presente Código.
- Un reconocimiento inicial de certificación del motor que se realizará a bordo cada vez que el motor sea objeto de una transformación importante.

El capítulo 5 del presente Código trata sobre los procedimientos para medir las emisiones de NO_x en un banco de pruebas y en él se especifican los métodos para medir y calcular las emisiones de gases de escape de los motores alternativos de combustión interna en condiciones de régimen constante. En cuanto a los fuelóleos utilizados para realizar el ensayo se determinarán y anotarán las características del utilizado para el ensayo. Para determinar el flujo de gases de escape existen diversos métodos:

- Método de medición directa: este método consiste en medir directamente el flujo de gases de escape mediante una tobera medidora del caudal o un sistema de medición equivalente y será conforme con una norma internacional reconocida.
- Método de medición del aire y del combustible: el método para determinar el flujo de gases de escape midiendo el aire y el combustible será conforme con una norma internacional reconocida. Este método implica medir el flujo de aire y el flujo de combustible. Para ello, se utilizarán caudalímetros de aire y de combustible.
- Flujo de combustible y método de equilibrado del carbono: este método entraña calcular el caudal másico de los gases de escape a partir del consumo de combustible, de la composición del combustible y de las concentraciones de gases de escape utilizando el método de equilibrado del carbono.

En el ensayo se realizarán análisis con los sistemas de muestreo y análisis que se recomiendan en el apéndice III del presente Código. Los principales componentes de los gases de componentes son: CO, CO₂, HC, NO_x y O₂. Estos gases deben figurar en las muestras. Para la evaluación de las emisiones gaseosas, se calculará el promedio de los datos registrados y las concentraciones de los compuestos

anteriormente mencionados y los resultados promediados se consignarán en porcentaje. Posteriormente, se procede a realizar el cálculo de las emisiones gaseosas teniendo en cuenta una serie de correcciones dependiendo si las emisiones se han medido en seco y para corregir los NO_x para tener en cuenta la humedad y la temperatura.

En el capítulo 6 del presente Código se dictan los procedimientos para demostrar el cumplimiento de los límites de NO_x a bordo. Después de la instalación de un motor que tenga certificación previa a bordo de un buque, el motor diésel marino será objeto de reconocimientos de verificación a bordo para verificar que sigue ajustándose al límite aplicable de emisión de NO_x. Dicha verificación del cumplimiento se realizará por uno de los siguientes métodos:

- Método de verificación de los parámetros del motor para confirmar que los componentes, reglajes y valores del funcionamiento de un motor no se han apartado de las especificaciones que figuran en el expediente técnico de dicho motor.
- Método simplificado de medición.
- Método directo de medición [16].

2.1.4 Normativa a nivel Unión Europea

Debido a que la Directiva 1999/32/CE ha sido modificada en varias ocasiones y de forma sustancial, se procedió a la codificación de dicha Directiva en aras de la claridad y la racionalidad. En ella se considera que la contaminación del aire causada por los buques atracados en puerto es una grave causa de preocupación para muchas ciudades portuarias, en lo que respecta a sus esfuerzos por respetar los límites de calidad del aire establecidos por la Unión. Además, los Estados miembros deben fomentar el uso de la red eléctrica en tierra toda vez que, hoy en día, la alimentación de electricidad de los buques se hace generalmente con ayuda de motores auxiliares. La presente Directiva dictamina que para garantizar una calidad mínima del combustible utilizado por los buques a efectos de las normas bien mediante los combustibles o bien mediante la tecnología, no debe permitirse la utilización en la Unión Europea de combustibles para uso marítimo cuyo contenido de azufre supere la norma general de 3,50 % en masa, excepto los suministros a buques que utilicen métodos de reducción de emisiones que operen con sistemas cerrados.

Las limitaciones en el contenido de azufre de determinados combustibles líquidos derivados del petróleo establecidas en la presente Directiva no se aplicarán al combustible utilizado por los buques de guerra y demás buques destinados a usos militares. No obstante, los Estados miembros tratarán de garantizar, mediante la adopción de medidas oportunas que no perjudiquen las operaciones ni la capacidad operativa de dichos buques, que estos funcionan, dentro de lo que es razonable y práctico, en consonancia con lo dispuesto en la presente Directiva.

En cuanto al contenido máximo de azufre del gasóleo, se garantizará que los Estados miembros garantizarán que no se utilicen en su territorio gasóleos cuyo contenido de azufre supere el 0,10 % en masa. Para los combustibles para uso marítimo utilizado en aguas territoriales, zonas económicas exclusivas y zonas de control de emisiones de SO_x, y utilizados por buques de pasajeros en servicios regulares efectuados desde o hacia puertos desde la Unión, se establece que a partir de 2020, no se utilicen combustibles con contenido en azufre superior a 0,50 % y para dentro de las zonas de control de emisiones 0,10 %. Además, los Estados miembros no permitirán para buques que se encuentran atracados en sus puertos combustibles destinados para el uso marítimo con un contenido de azufre superior al 0,10 % por lo que la tripulación del buque podrá tener un tiempo suficiente para lograr el cambio de combustible lo antes posible del atraque y lo más tarde posible antes de la salida. En cuanto a esto, los buques deberán registrar todo cambio de combustible en el libro de navegación indicando la hora a la que ha sido efectuado.

Por otra parte, se permite que los buques de cualquier pabellón utilicen métodos de reducción de emisiones en sus puertos, aguas territoriales, zonas económicas exclusivas y zonas de control de la

contaminación como alternativa a la utilización de combustibles para uso marítimo con el requisito indispensable de que deben cumplir los límites anteriormente descritos. En el anexo I de la presente directiva, se establecen los valores equivalentes de emisión para los métodos de reducción de emisiones [17].

Contenido de azufre de los combustibles para uso marítimo (% m/m)	Relación de emisiones de SO₂ (ppm)/CO₂ (% v/v)
3,50	151,7
1,50	65,0
1,00	43,3
0,50	21,7
0,10	4,3

Tabla 2-2 Valores equivalentes para buques con métodos de reducción de SO_x [17]

2.1.5 Normativa a nivel nacional

Según la Directiva (UE) 2016/2284 [18] del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a la reducción de las emisiones nacionales de determinados contaminantes atmosféricos, establece:

- Los compromisos de reducción de emisiones de los Estados miembros para las emisiones atmosféricas antropogénicas de dióxido de azufre SO₂, óxidos de nitrógeno NO_x, compuestos volátiles no metálicos (COVNM), amoníaco (NH₃), y partículas finas (PM_{2,5}).
- Los Estados miembros debe elaborar, adoptar y aplicar un programa nacional de control de la contaminación atmosférica con el fin de cumplir sus compromisos de reducción de emisiones y contribuir efectivamente a la consecución de los objetivos de calidad del aire. Por ello, se han examinado las opciones estratégicas para cumplir los compromisos en materia de contaminación atmosférica de manera que se seleccionan unas políticas y medidas adicionales que conlleven un cumplimiento de los techos de emisiones establecidos para cada contaminante.

El programa [19] propone un paquete de medidas para la reducción de emisiones en puerto ya que tienen un efecto relevante en la calidad del aire de los núcleos urbanos y regiones litorales en los que se encuentran. Esta serie de medidas establecidas por el programa son de aplicación a todo el territorio nacional incluyendo las islas Canarias. En él se impulsa un nuevo concepto, los puertos verdes, en el que se impone una serie de comportamientos que contribuyan a respetar el medio que les rodea adoptando medidas de mejora y control de la calidad del aire.

Las medidas que propone para la consecución de los objetivos son las siguientes:

- Impulso de energías alternativas y renovables en puertos: se promueve la investigación para la implantación de muelles que permitan el suministro de electricidad a buques en varios puertos españoles de interés general.
- Control de las emisiones difusas en puertos: se elaborarán normas con el objetivo de controlar las operaciones que seas susceptibles de generar emisiones difusas.
- Fiscalidad: se mejora la política fiscal para la electricidad suministrada directamente a los buques atracados en puerto.

El Real Decreto 818/2018, de 6 de julio, que tiene por objeto incorporar al ordenamiento jurídico español las previsiones contenidas en la Directiva 2016/2284 (UE) y fija los objetivos de reducción de las emisiones atmosféricas antropogénicas, regula el contenido y el procedimiento para la elaboración del programa nacional y establece un sistema para el seguimiento de las emisiones y de sus efectos en los ecosistemas. Mientras que el programa nacional incluye a la totalidad de la nación española, este

decreto excluye a las islas Canarias por razones geográficas. Además, este real decreto no afecta a las emisiones de los equipos y sistemas pertenecientes a las Fuerzas Armadas españolas.

2.2 Sistemas de propulsión

En el anterior apartado se introdujo el motor diésel mencionando su especial relevancia en el ámbito marítimo y las restricciones que se le aplican sobre sus emisiones de NO_x y SO_x. Por consiguiente, en esta parte se describen sus características y funcionamiento, cómo forma parte de los sistemas de propulsión de los buques de la Armada Española y se describen los modos en los que el motor diésel es implementado en los buques.

2.2.1 Funcionamiento del motor diésel

El motor diésel fue inventado por Rudolf Diesel y patentado en 1892 en varios países de europeos. La producción de emisiones de contaminantes está vinculada con el proceso de combustión de estos motores. Por lo tanto, para poder entender cómo se forman es necesario entender cómo es el funcionamiento de los motores de combustión interna alternativos, en concreto, el diésel.

Según el ciclo de trabajo los motores alternativos se pueden clasificar en motores de cuatro tiempos (4T) y motores de dos tiempos (2T). Actualmente, los buques de la Armada española utilizan en sus plantas de propulsión y para la generación de electricidad a bordo los motores de 4T. Los motores diésel de 2T son montados principalmente en buques de gran porte.

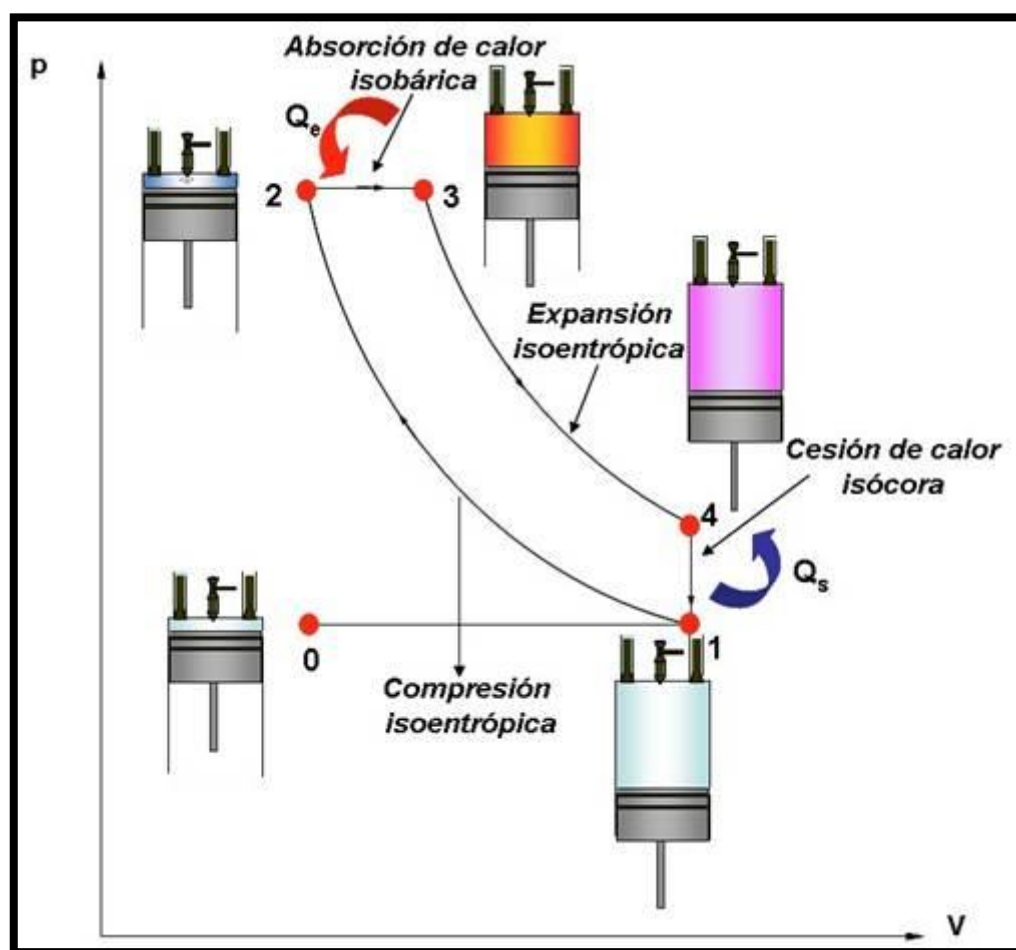


Figura 2-7 Diagrama teórico de trabajo de un ciclo diésel [20]

En la Figura 2-7 se representa el diagrama teórico P-V del ciclo termodinámico diésel junto a imágenes esquemáticas del posicionamiento del pistón durante el ciclo [20]. A continuación, se explica el desarrollo de los distintos períodos de trabajo sobre el diagrama de trabajo [21]:

- PUNTO 0: apertura de la válvula de aspiración. El émbolo se encuentra en el punto muerto superior.
- PUNTO 1: cierre de la válvula de aspiración. El émbolo se encuentra en el punto muerto inferior.
- PUNTO 2: comienzo de la inyección del combustible. El émbolo se encuentra en el punto muerto superior.
- PUNTO 3: finaliza la inyección de combustible. El émbolo está descendiendo.
- PUNTO 4: apertura de la válvula de escape. El émbolo se encuentra en el punto muerto inferior. La presión de los gases de escape desciende instantáneamente hasta igualarse con el valor de la presión atmosférica.
- PUNTO 5 (coincide con el punto 0): cierre de la válvula de escape. El émbolo se encuentra en el punto muerto superior.

Sin embargo, el ciclo real es el que representa con mayor precisión las condiciones efectivas de funcionamiento de un motor [22]. En la práctica, para obtener eficiencia se realizan algunas modificaciones respecto a los puntos teóricos descritos anteriormente. En la Figura 2-8 se representa con un diagrama presión frente a volumen de un ciclo termodinámico real de un motor diésel.

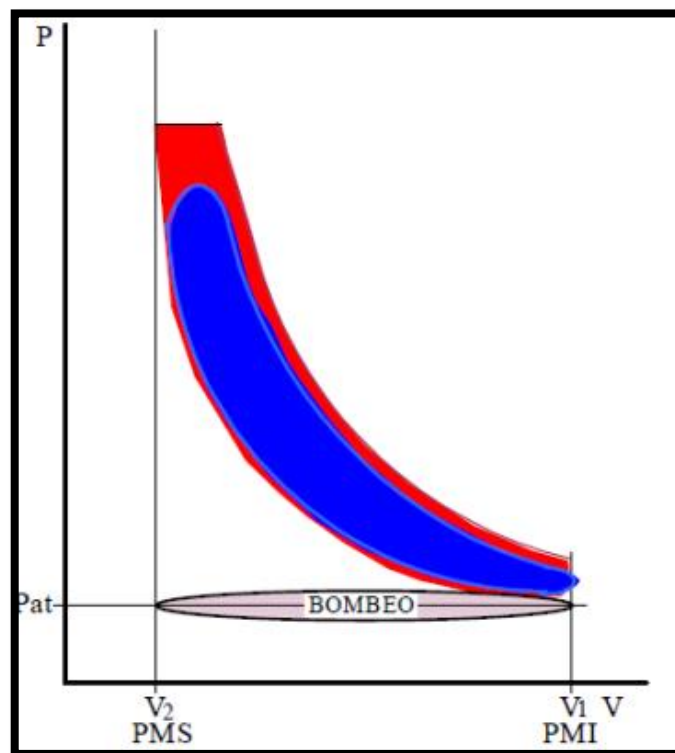


Figura 2-8 Diagrama práctico de trabajo [22]

En los motores de 4T el ciclo de trabajo se completa con dos vueltas de cigüeñal. Se diferencian 4 etapas: admisión, compresión, expansión y escape [23].

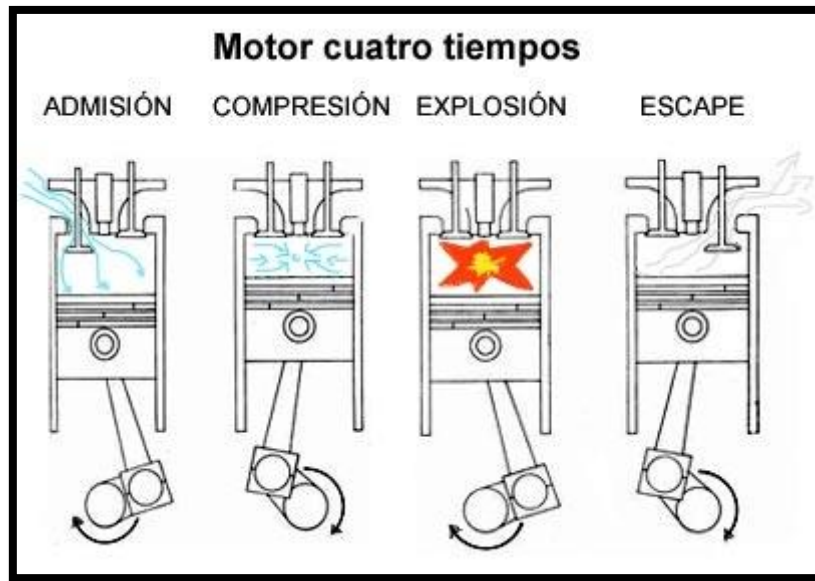


Figura 2-9 Esquema de funcionamiento de un motor diésel de 4T [23]

A continuación, se describen de manera general los cuatro procesos. En la primera fase, la admisión, el aire entra por la válvula de admisión gracias al vacío que crea el pistón al realizar la bajada por el cilindro. Cuando el pistón llega al punto muerto inferior, se produce el inicio de otra etapa, la compresión. En esta fase, el cilindro está cerrado por lo que al ascender el pistón hasta el punto muerto superior (PMS) se produce la compresión de la mezcla de aire y combustible produciéndose la combustión. En la tercera carrera, en la cual se realiza el trabajo, gracias a la combustión el pistón se desplazada desde el PMS hasta el punto muerto inferior (PMI). En la última fase, la válvula de escape se abre cuando el pistón llega al PMI de manera que cuando el pistón inicia de nuevo su carrera ascendente los gases quemados de escape salen del cilindro. Cuando llega el pistón al PMS, la válvula de escape se vuelve a cerrar para dar inicio a otro ciclo de trabajo.

En el motor de 2T, a diferencia de los motores de 4T, el ciclo de trabajo se realiza en una sola vuelta de cigüeñal, es decir 360° , debido a que para un momento dado del ciclo de trabajo, el motor 2T produce más de una función y por tanto las etapas que constituyen el ciclo de trabajo poseen menor duración angular. Esto se traduce en una mayor simplicidad del sistema.

En la Figura 2-10, se representan las diferentes etapas del motor diésel de 2T.

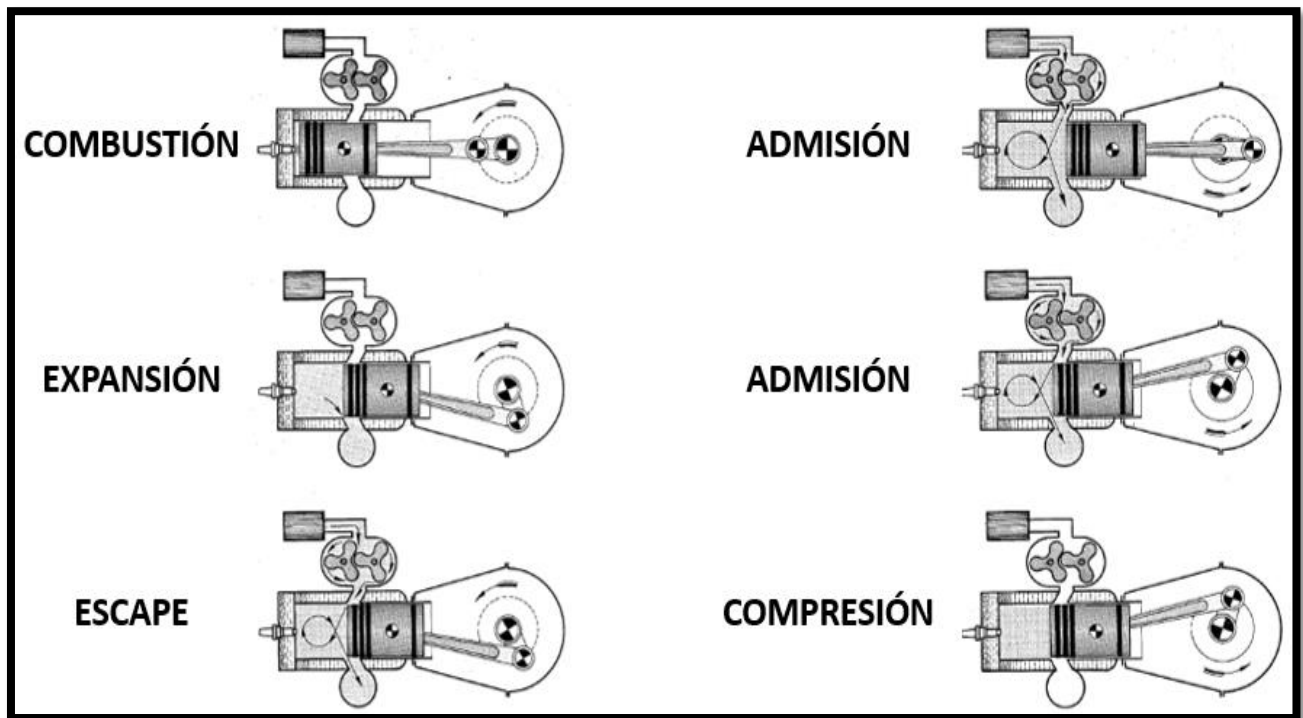


Figura 2-10 Esquema de funcionamiento de un motor diésel de 2T [38]

A diferencia del motor de 4T, el motor lleva lumbreras de barrido y puede llevar lumbreras de escape en vez de válvulas de escape. Las lumbreras a groso modo podrían describirse como orificios o aberturas practicadas en el propio cilindro que quedan descubiertas por el propio movimiento del émbolo. En la fase inicial, cuando se realiza la combustión, el pistón realiza su carrera motriz hasta que éste descubre la lumbrera o se activa la válvula de escape de manera que los gases quemados abandonan la cámara de combustión reduciendo su presión. Antes de llegar al PMI, se inicia la admisión de una nueva mezcla por alguno de los dos modos, por lumbreras o mediante válvulas. Gracias a la admisión, los gases de escape salen de la cámara ya que los gases frescos entran a mayor presión de manera que se produce el barrido de los gases de escape. Cuando el pistón llega a su PMI, todavía se siguen expulsando gases de escape. Durante la carrera ascendente, se produce el cierre de ambas válvulas o lumbreras por lo que el proceso de compresión no se inicia justo cuando el émbolo inicia la carrera descendente, es decir, cuando éste está en el PMI.

Existen dos tipos de motores en función de la presión existente en el colector de admisión. En la aspiración natural, los gases frescos entran en el cilindro debido a la succión que crea el cilindro cuando el émbolo realiza su carrera descendente. Por otro lado, los motores sobrealimentados utilizan compresores para introducir mayor cantidad de aire en la mezcla. Los beneficios por utilizar esta técnica son varios, el motor es capaz de introducir una mayor cantidad de aire en la cámara de combustión por lo que el aire se mezcla mejor con el combustible, se quema mayor cantidad de combustible y se puede quemar la misma cantidad en mejores condiciones. Todas estas ventajas se traducen en motores más pequeños que desarrollan una potencia y par superior a un motor atmosférico las mismas características.

A continuación, en la Figura 2-11 se muestra un esquema de un motor con sobrealimentación. A la salida del compresor hay un intercambiador de calor aire-aire del tipo de carcasa-tubos o también conocido como intercooler para disminuir la temperatura del aire de sobrealimentación para obtener una mayor potencia y un mejor rendimiento del motor [24].

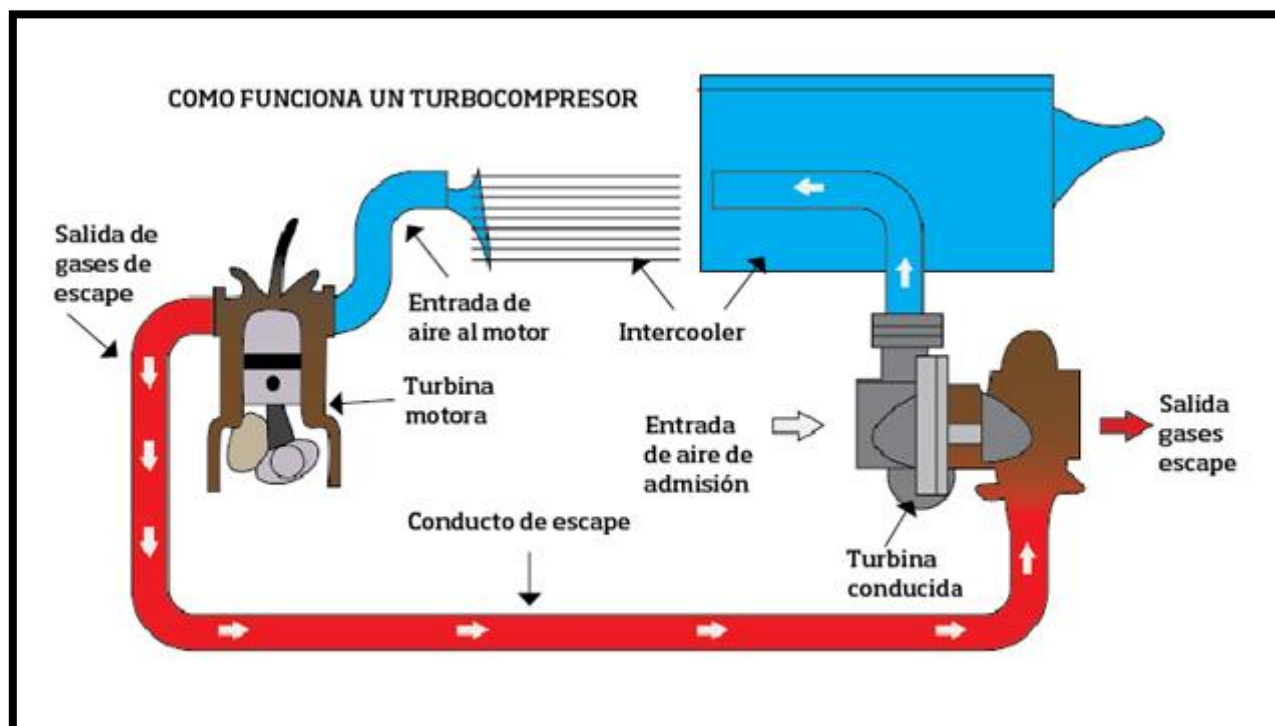


Figura 2-11 Esquema de un motor con sobrealimentación [24]

Existen diversos sistemas de sobrealimentación según el método de accionamiento del compresor, el tipo de compresor, la transferencia de potencia entre el motor y el sistema de sobrealimentación y el tipo de motor que sobrealimenta. En cuanto a tipo de compresor, se distinguen entre aquellos con desplazamiento positivo, volumétricos o turbocompresores. La Figura 2-12 muestra el funcionamiento de un turbocompresor.

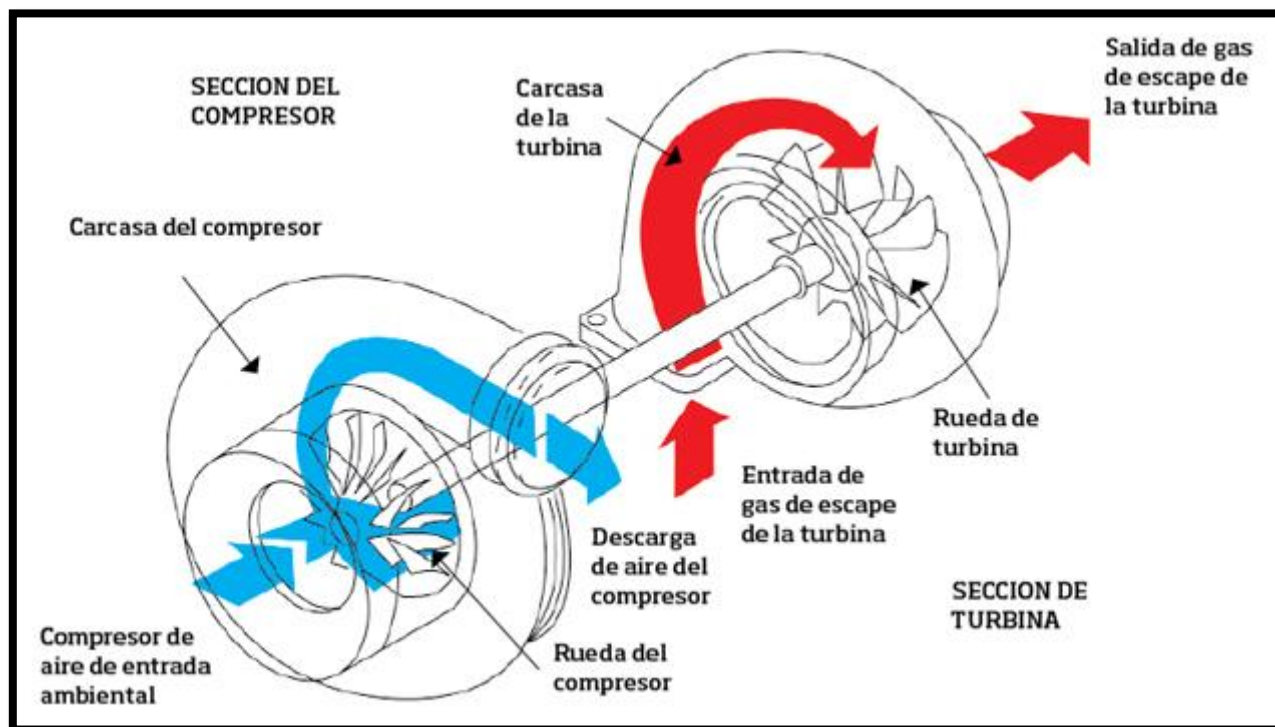


Figura 2-12 Esquema de funcionamiento de un turbocompresor [24]

En los motores de encendido por compresión el combustible siempre se inyecta a alta presión al final de la carrera de compresión formándose la mezcla en la propia cámara de combustión, o en la precámara en el caso de los motores Diésel de inyección directa. Debido a que el aire comprimido debe de alcanzar temperaturas altas para que cuando el combustible sea inyectado éste se queme, el combustible es introducido al final de la carrera de manera que éste no combustione antes de lo estimado. Esto provoca que el sistema de inyección funcione bajo unos requisitos muy estrictos.

El aire dentro de la cámara de combustión se mezcla con el combustible de manera heterogénea cuando debería ser totalmente homogénea para que todo el combustible fuera quemado a la vez. Esto es debido a que en los motores diésel, a medida que se inyecta el combustible se va produciendo la combustión por lo que solo las primeras partículas de combustible encuentran a su entrada en el cilindro aire puro. Consecuentemente, no existe una zona claramente definida donde se produce la combustión. Para solucionar este problema, se necesita que el combustible inyectado quede distribuido perfectamente en la cámara de combustión con la mayor rapidez posible [25].

2.2.2 Sistemas de propulsión de los buques de la Armada Española

En la lista oficial de buques de la Armada Española promulgada en el año 2020 firmada por el que fue Almirante General Jefe de Estado Mayor de la Armada Don Teodoro Esteban López Calderón, figuran los buques que se encuentran en estado operativo. A día de hoy, la Armada cuenta con 93 buques en activo, además de las 45 unidades de auxiliares, bajo dependencia de la Agencia Tributaria a través de Aduanas [26].

A modo de resumen, se pueden clasificar los buques de la Armada Española en los siguientes grupos:

- Buque de proyección estratégica: 1.
- Fragatas: 11 (5 clase “Álvaro de Bazán” y 6 clase “Santa María”).
- Submarinos: 3.
- Anfibios: 2.
- Lanchas de desembarco: 12.
- Aprovisionamiento de combate: 2.
- Transporte ligero: 1.
- Salvamento y rescate: 1.
- Auxiliares: 3.
- Remolcadores: 2.
- Medidas contraminas: 6.
- Buques de acción marítima: 12 (6 clase “Meteoro”, 2 clase “Descubierta” y 4 clase “Serviola”).
- Patrulleros: 11 (2 clase “Toralla”, 3 clase “Chilreu”, 3 clase “Anaga”, 2 de vigilancia costera y 1 de vigilancia interior).
- Hidrográficos: 3 (2 clase “Malaspina” y 1 clase “Cástor”).
- Investigación oceanográfica: 1.
- Buques escuela: 2.
- Veleros escuela: 9.
- Lanchas de instrucción: 8.
- Lanchas hidrográficas transportables: 3.

En definitiva, respecto a los niveles de clasificación (nivel I, nivel II, nivel III) que establece el Anexo VI en función de la fecha de construcción, se clasifican los buques de la siguiente manera:



Figura 2-13 Clasificación de la flota española según el Anexo VI (Autoría propia)

Como se puede ver, la mayoría de los buques de la Armada Española están clasificados como nivel I, el nivel más bajo de restricción de emisiones de óxido de nitrógeno. Sólo los tres últimos buques de acción marítima construidos están clasificado en los niveles II y III.

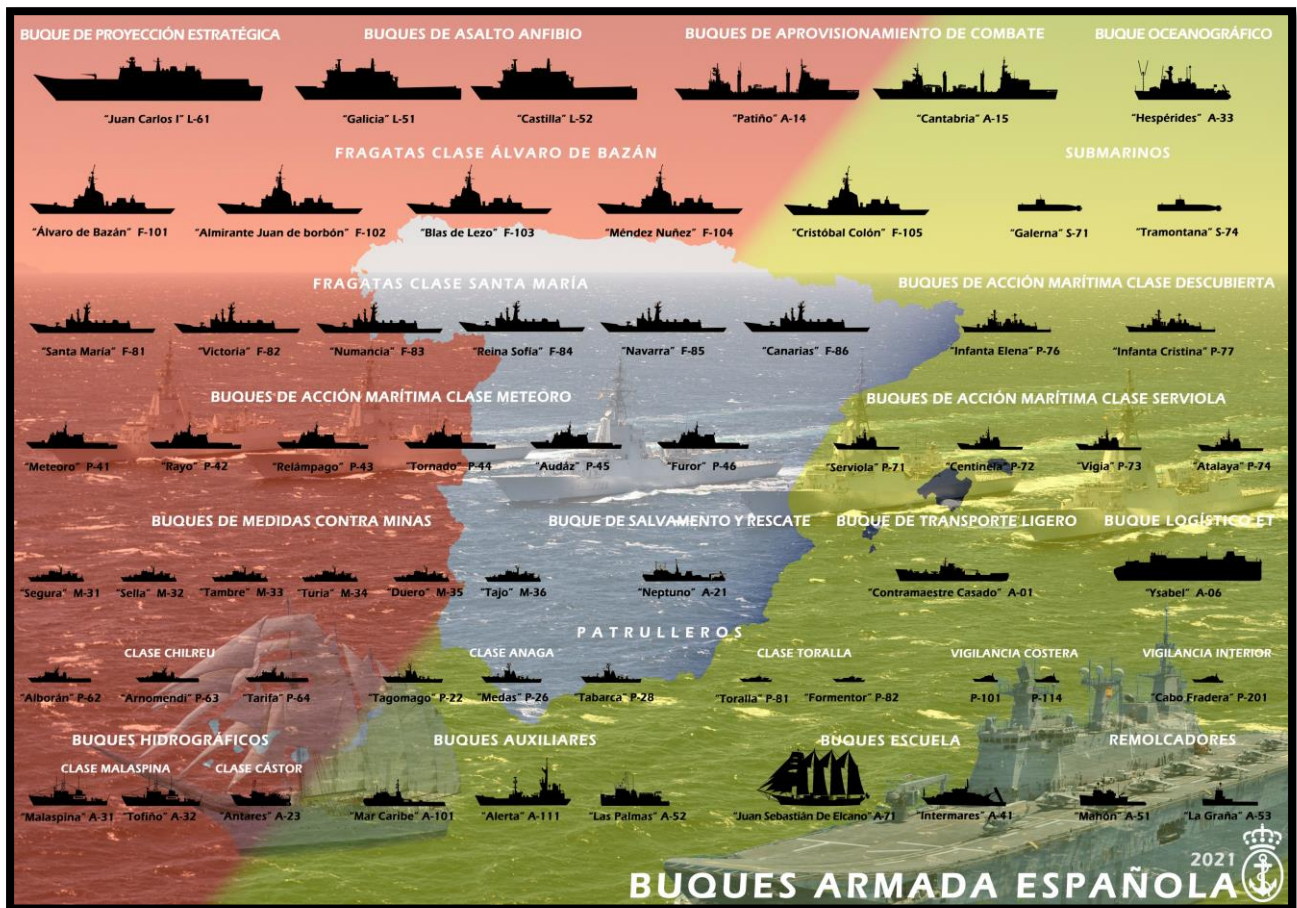


Figura 2-14 Lámina Lista oficial de buques de la Armada Española [26]

	JUAN CARLOS I • TURBINAS DE GAS • 2 DIÉSEL GENERADORES
	FRAGATAS CLASE "SANTA MARÍA" • 2 TURBINAS DE GAS • 4 DIÉSEL GENERADORES
	FRAGATAS CLASE "ÁLVARO DE BAZÁN" • 2 TURBINAS DE GAS + 2 MOTORES DIÉSEL • 4 DIÉSEL GENERADORES
	BUQUES DE ASALTO ANFIBIO CLASE "GALICIA" • 2 MOTORES DIÉSEL + 1 MOTOR ELÉCTRICO • 4 DIÉSEL GENERADORES
	BUQUES DE APROVISIONAMIENTO PARA EL COMBATE • 2 MOTORES DIÉSEL • 4 DIÉSEL GENERADORES

Figura 2-15 Sistemas de propulsión de algunos buques (Autoría propia)

En la Figura 2-15 aparecen los sistemas de propulsión que poseen algunos buques de la Armada Española tanto para la propulsión de la plataforma como los motores utilizados para la generación de electricidad a bordo.

Como se puede ver, el motor diésel se encuentra presente en todos los buques de la Armada Española de mayor porte. Están implementados tanto para ser utilizados para la propulsión del buque como para la generación de electricidad de a bordo, por lo que son un elemento clave en el diseño de la plataforma que forma parte de la mayor parte de sistemas de propulsión mixtas que serán descritos en el siguiente apartado.

2.2.3 Clasificación de los sistemas de propulsión

Actualmente, existen múltiples maneras para propulsar un buque. Para diseñar una planta de propulsión de un buque se deben tener en cuenta diversos parámetros, además de buscar un equilibrio entre los aspectos técnicos y las capacidades operacionales que necesita el buque para cumplir con su misión. Los tipos de instalación más usuales son:

- Propulsión a vapor (combustible fósil):
 - Generación del vapor: tales como calderas de tubo de agua, con o sin circulación forzada o con hogar presurizado.
 - Máquinas propulsoras: se distinguen dos vertientes, las turbinas de vapor y la propulsión turbo-eléctrica.
- Propulsión por máquinas de combustión interna:
 - Motores diésel de dos o cuatro tiempos:
 - Lentos directamente acoplados.
 - Semi-rápidos y rápidos engranados.
 - Disposición diésel eléctrica.
- Propulsión por turbinas de gas:
 - Solas con reductor de engranajes.
 - Disposición de gas-eléctrica.
- Propulsión nuclear:
 - Generación del vapor: reactor atómico PWR.
 - Máquina propulsora: turbinas de vapor de características especiales.

Especialmente en buques de guerra se tiende a incorporar en los sistemas de propulsión instalaciones mixtas. Esto se debe a que existe un rango de situaciones operativas en las cuales tendrá que buscar el mejor comportamiento de la plataforma para equilibrar la balanza entre aspectos técnicos y las capacidades operacionales. Por ejemplo, si la plataforma debe ser veloz y ágil, hay que tener en cuenta el desplazamiento y la autonomía. Por otro lado, si se busca es una autonomía considerable, hay que centrarse en el consumo del combustible, capacidad de almacenamiento, los costos de la instalación y operación. Pero ante todo, los buques deben poseer un sistema de propulsión seguro, flexible, fiable y fácil de operar. En las instalaciones mixtas se busca utilizar varias máquinas sean o no del mismo tipo y sean o no de las mismas características para dar las distintas velocidades. Por norma general, se dispone de dos tipos de máquinas, una de bajo consumo que proporcione una potencia suficiente para poder navegar a velocidad de crucero durante un tiempo considerable y otra que permita en ciertas ocasiones dar una potencia mayor aunque el consumo específico sea mayor que confieren una mayor versatilidad, flexibilidad y economía en la operación de los buques.

A continuación se describen las distintas configuraciones de la planta propulsora que se utilizan en los buques de guerra [27]. Las más conocidas son:

- Plantas combinadas de turbinas a vapor y turbinas a gas (COMbined Steam And Gas, COSAG): estas plantas están compuestas de turbinas de vapor y de turbinas de gas. En esta variante es

necesario la instalación de dispositivos de reducción, acoplamiento y embragues que permitan trabajar individualmente o de manera conjunta.

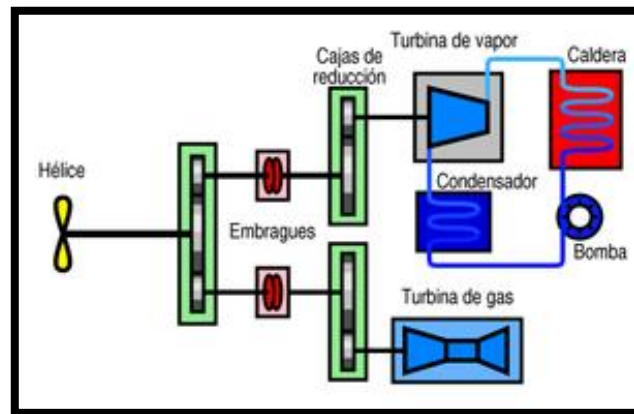


Figura 2-16 Esquema de un sistema de propulsión COSAG [27]

Las principales ventajas de esta configuración son la confiabilidad de la planta a vapor, la rápida aceleración, arranque instantáneo y buena relación peso/potencia de las turbinas a gas. Este tipo de planta propulsora se utilizó principalmente en buques de pequeño porte como fragatas o destructores aproximadamente entorno a los años 70.

- Plantas combinadas de turbinas a gas y turbinas a vapor de ciclo combinado (COmbined Gas And Steam, COGAS): funcionan bajo el denominado Ciclo Combinado. Éste consiste en utilizar dos ciclos de generación de potencia. La turbina de vapor se alimenta con el vapor generado por el calor en las toberas de salida de las turbinas de gas, que de otro modo se perdería. Por ello, se consigue disminuir el consumo de combustible alcanzando rendimientos de hasta el 58 %. A diferencia de otro tipo de plantas, los sistemas COGAS en ciclo combinado no pueden operar individualmente sino que tienen que trabajar conjuntamente ya que no sería tan eficiente. Esta configuración es usada comúnmente en las centrales de generación eléctrica y no tanto en los buques de guerra.

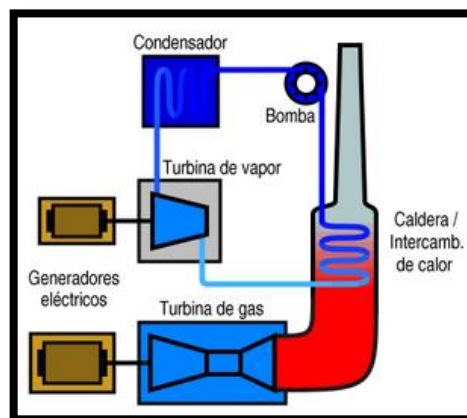


Figura 2-17 Esquema de un sistema de COGAS turbo eléctrico [27]

- Plantas combinadas de motores diésel y motores diésel (COmbined Diesel And Diesel, CODAD): el principio de su funcionamiento se basa en el uso de dos motores diésel para suministrar potencia a un único árbol de hélice. Un sistema de transmisión y embragues permiten acoplar los motores indistinta o conjuntamente al árbol. Gracias a esto, se pueden usar motores pequeños que reducen el consumo de combustible cuando se requieren velocidades menores.

Por otra parte, también existen plataformas con dos ejes de propulsión que conectan un motor diésel a cada árbol de transmisión que son totalmente independientes entre ellos por lo que no podrían incluirse dentro de esta categoría.

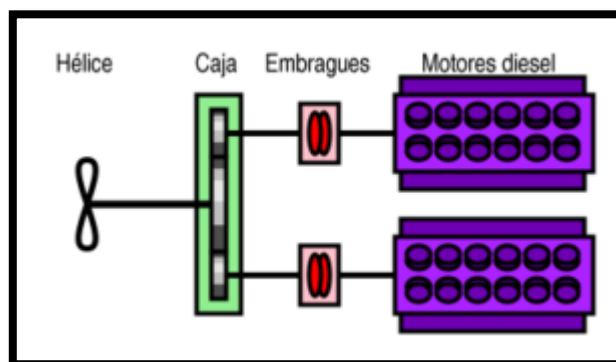


Figura 2-18 Esquema de un sistema de propulsión CODAD [27]

- Plantas combinadas de motores diésel o turbinas de gas (COMbined Diesel Or Gas, CODOG): en esta configuración combina a un único eje de propulsión un motor diésel y una turbina de gas de manera que no pueden trabajar conjuntamente. La principal característica del CODOG es que cada sistema, es decir, la turbina de gas o el motor diésel, tienen distintas finalidades. Mientras que el motor diésel es utilizado para propulsar el buque cuando navega a baja velocidad y relativa maniobra, la turbina de gas entra cuando se requieren mayores velocidades por lo que se pone ésta en servicio y se desacopla el motor diésel. La principal ventaja de esta planta, es una transmisión más simple a expensas de necesitar turbinas de gas más potentes ya que el motor diésel en este caso no proporciona trabajo cuando la turbina de gas está funcionando. Esto se

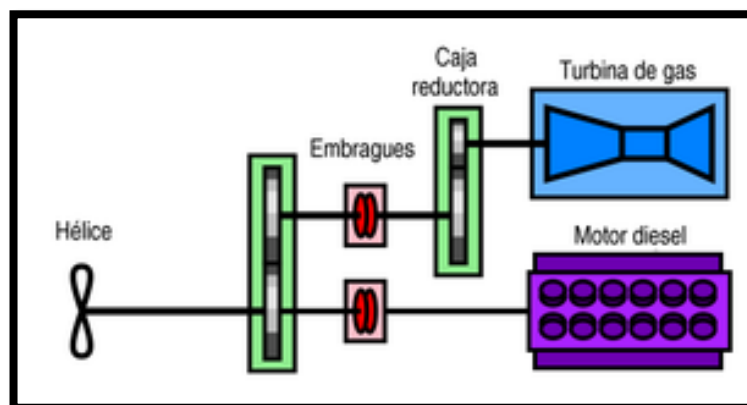


Figura 2-19 Esquema de un sistema CODOG [27]

traduce en un mayor consumo comparado con otros sistemas como el CODAG.

Son principalmente utilizadas en buques que necesitan una velocidad operativa mucho mayor que su velocidad de crucero tales como fragatas, destructores y corbetas, es decir, buques con poco desplazamiento que necesitan una gran maniobrabilidad en ciertos momentos.

- Plantas combinadas de motores diésel y turbinas de gas (COMbined Diesel And Gas, CODAG): a diferencia de la configuración mencionada anteriormente, el motor diésel y la turbina de gas pueden trabajar conjuntamente.

Por ejemplo, cuando el buque necesita navegar a velocidades mayores se pondrá en funcionamiento la turbina que conferirá una mayor potencia por lo que para velocidades menores a veinte nudos podrán trabajar sólo los motores diésel ahorrando combustible ya que la turbina durante su funcionamiento consume una cantidad considerable de combustible. Sin embargo, este tipo de planta requiere de un sistema de engranaje y transmisiones mucho más complejos que las CODOG ya que el motor diésel y la turbina van a proporcionar potencia a la vez de modo que requiere mayor complejidad en el diseño y por lo tanto puede ser fuente de averías. Además, requieren de hélices de paso variable para limitar las revoluciones debido a la gran diferencia de potencia cuando funcionan sólo los motores diésel y cuando entra la turbina de gas. Otra ventaja frente a las plantas CODOG es que ocupan mucho menos espacio ya que no hacen falta motores grandes.

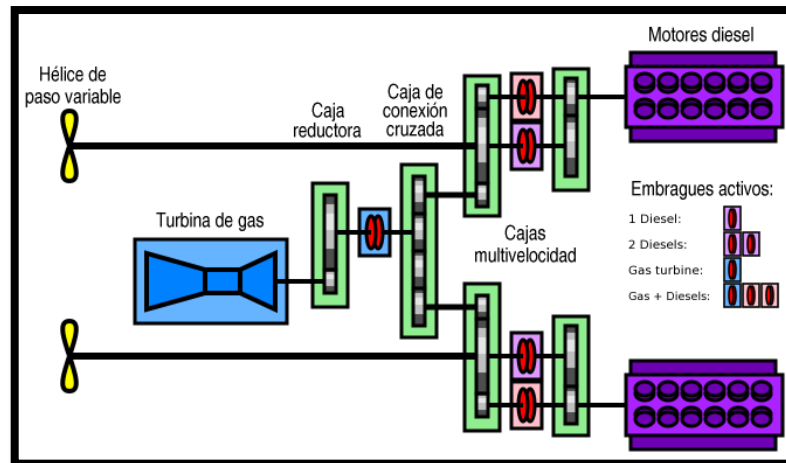


Figura 2-20 Esquema de un sistema CODAG [27]

- Combinación de turbinas gas o turbinas a gas (COMbined Gas Or Gas, COGOG): este sistema de propulsión está formado por dos turbinas con distintas prestaciones (una de baja potencia y otra de alta potencia) que sólo podrán operar individualmente. Por lo tanto, se utilizará una u otra dependiendo de la velocidad que se necesite.

En cuanto a ventajas, este tipo de plantas poseen una buena relación de peso/potencia al igual que el sistema CODOG anteriormente mencionado y además no se necesitan sistemas complejos para la transmisión.

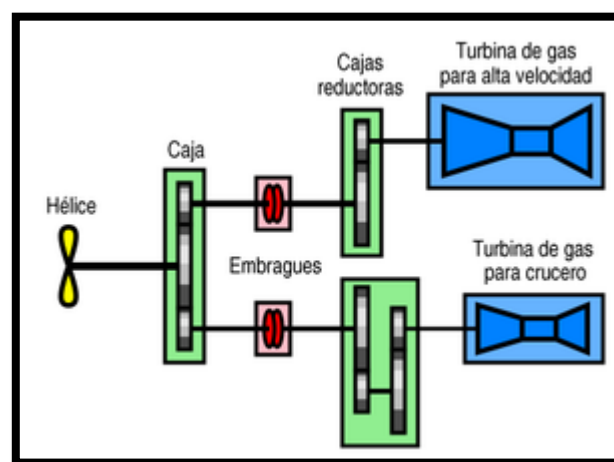


Figura 2-21 Esquema de sistema de propulsión COGOG [27]

- Plantas combinadas de motores diésel-eléctricos y turbinas a gas (COMbined Diesel-eLectric And Gas, CODLAG): es una modificación de la configuración CODAG en la que se incluyen motores eléctricos que están directamente conectados a los ejes de las hélices. La electricidad que necesita el motor eléctrico es proporcionada por los motores diésel que funcionan como generadores. Cuando se necesitan velocidades mayores a las velocidades de crucero se conecta la turbina de gas. Además, los motores diésel que están para dar funcionamiento a los motores eléctricos también ofrecen electricidad al resto del barco por lo que no hacen falta otros motores diésel que funcionen como generadores para dar electricidad al buque. Los motores eléctricos pueden conectarse directamente al árbol de hélice ya que trabajan sobre un rango mayor de revoluciones de modo que pueden usarse transmisiones mucho más simples para combinar la salida mecánica de los sistemas de turbina y diésel-eléctricos. Por lo tanto, hace poder disminuir los costos de servicio ya que los motores eléctricos requieren mucho menos mantenimiento.

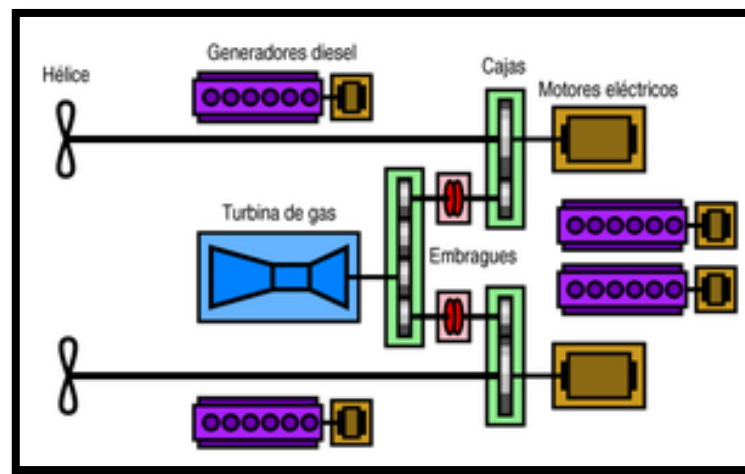


Figura 2-22 Esquema de un sistema de propulsión CODLAG [27]

- Además, si el buque posee baterías recargables puede disminuir notablemente la acústica producida por el sistema de propulsión del buque. Desde el punto de vista operativo, esta ventaja le confiere al buque una mayor discreción cuando está navegando de manera que este sistema puede ser bastante eficiente para ser utilizado en el ámbito de guerra antisubmarina. Desde el punto de vista medioambiental, el buque puede navegar sólo con los motores eléctricos y cumplir con las zonas de control de emisiones. Aunque el buque no posea estas baterías, el motor eléctrico no está mecánicamente conectado al motor diésel, por lo que el aislamiento de los motores diésel es mejor.
- Combinación de turbinas gas (COMbined Gas And Gas, COGAG): en este sistema dos turbinas de gas están conectadas a una sola hélice y estas ofrecen potencia de forma individual o conjuntamente. Debido a que una turbina es más eficiente cuando está trabajando cerca de su nivel máximo de potencia, con esta configuración se logra optimizar el uso de la turbina a la hora de navegar a velocidades de crucero utilizando la turbina de baja potencia. Sin embargo,

para velocidades de crucero los motores diésel presentan más ventajas que las turbinas aunque éstas ocupen menos espacio.

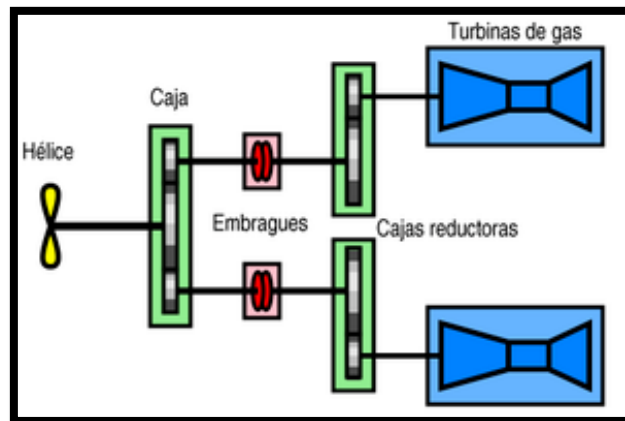


Figura 2-23 Esquema de un sistema de propulsión COGAG [27]

2.3 Combustibles marinos

El combustible marino es aquel que está destinado a ser utilizado a bordo de los buques. El combustible que sirve para el funcionamiento de los motores diésel proviene de uno de los combustibles fósiles más utilizados, el petróleo. El crudo es un líquido aceitoso, viscoso e inflamable, constituido por una mezcla de hidrocarburos y otros compuestos orgánicos como parafinas, naftenos y aromáticos así como pequeños contenidos en azufre que se encuentra en determinadas formaciones geológicas. Éste es un recurso natural no renovable que actualmente es la principal fuente de energía a nivel mundial. Es de origen fósil y en condiciones normales, es un líquido que puede presentar gran variación en diversos parámetros como color y viscosidad (desde amarillentos y poco viscosos hasta líquidos negros tan viscosos que apenas fluyen), densidad, capacidad calorífica, etc. Estas variaciones son debido a la diversidad de concentraciones de los hidrocarburos que componen la mezcla [28].

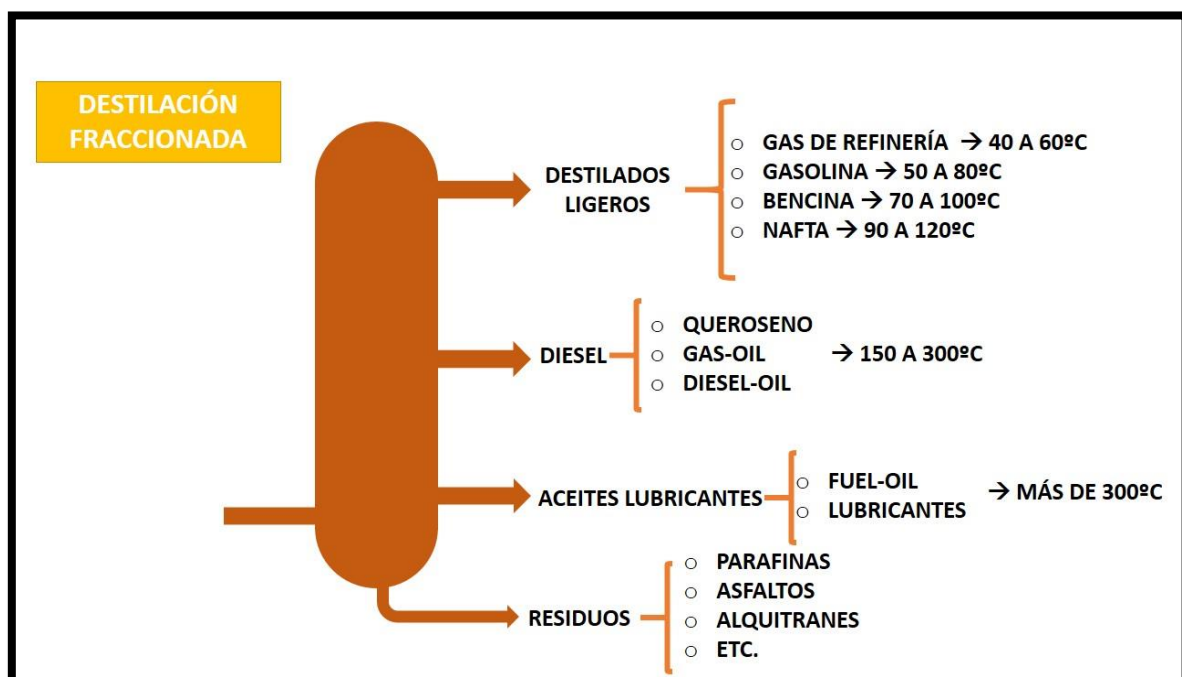


Figura 2-24 Esquema sobre la destilación fraccionada (Autoría propia)

Mediante la destilación del petróleo se obtienen progresivamente todos aquellos compuestos de temperatura de ebullición parecida, y que tienen características también parecidas. La transformación química se produce gracias al craqueo en el cual el compuesto químico, este caso el petróleo, se descompone o fracciona en compuestos más simples [29].

En la columna de fraccionamiento se separan los hidrocarburos ya que cada uno de ellos posee un punto de ebullición distinto. En la extracción de los distintos derivados del petróleo no existen desperdicios, desde los gases de refinería más ligeros hasta los residuos asfálticos, tiene valiosa utilidad con diversas aplicaciones. A forma de resumen se pueden establecer cuatro grandes grupos, según los intervalos de temperatura entre los cuales estos grupos se hallen comprendidos durante la destilación fraccionada como se puede ver en el anterior diagrama [21].

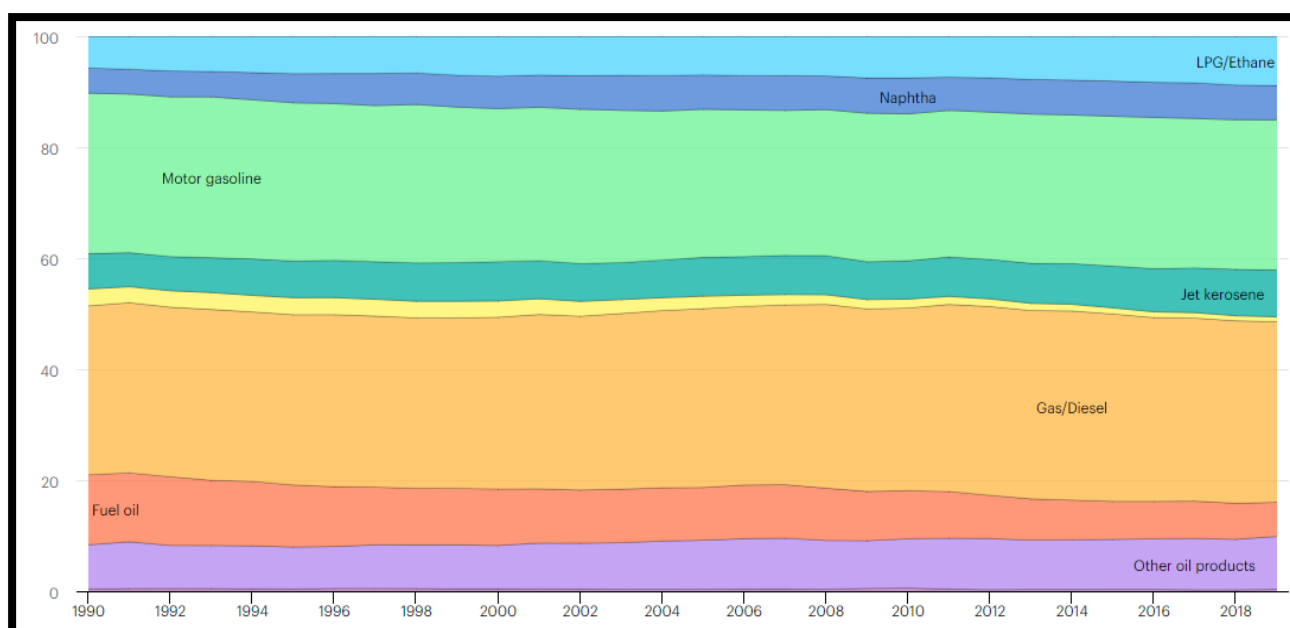


Figura 2-25 Porcentaje aproximado de cada componente que se obtiene del petróleo [30]

En la Figura 2-25 se refleja el porcentaje de petróleo que ha sido destinado a cada producto derivado a nivel mundial a lo largo de los años [30]. Es reseñable que el diésel junto con el gas representa un gran porcentaje frente los otros productos. Por lo tanto, estudiar e investigar sobre la eficiencia de los motores que funcionan con diésel para disminuir su consumo y por ende reducir las emisiones contaminantes.

2.3.1 Composición del petróleo

La composición del petróleo varía mucho en función de dónde se encuentre geográficamente su yacimiento. La composición del petróleo varía tanto en los elementos presentes como en los compuestos químicos que lo forman. Los elementos predominantes son el carbono (83,0% a 87,0% en peso) y el hidrógeno (10,0% a 14,0% en peso), apareciendo también azufre (desde trazas hasta un 6% en peso), nitrógeno (hasta un 2,0% en peso), oxígeno (hasta un 1,5% en peso) y en menor cantidad metales y otros no metales [31].

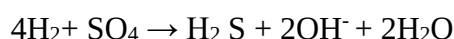
El contenido de azufre en los crudos suele ir del 0,05% y el 6% en peso dependiendo del lugar geográfico donde se haya extraído el petróleo como se puede ver en la siguiente tabla.

Nombre del crudo	País de origen	% en peso del azufre
Bu Attifel	Libia	0,10
Arjuna	Indonesia	0,12
Bonny light	Nigeria	0,13
Hassi Messaoud	Argelia	0,18
Ekofisk	Mar del Norte (Noruega)	1,80
Arabian Light	Arabia Saudita	1,80
Kirkuk	Irak	1,95
Kuwait	Kuwait	2,50
Arabian Heavy	Arabia Saudita	2,87
Cyrus	Irán	3,48
Boscan	Venezuela	5,40

Tabla 2-3 Contenido en azufre de algunos crudos [31]

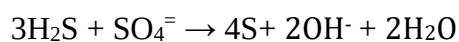
No obstante, existen excepciones en cuanto al contenido de azufre medido en los crudos ya que son demasiado elevados. En Estados Unidos, el crudo de Rozel Point contiene un 13,95 % en peso de azufre. En Europa, el crudo de Etzel de Alemania contiene un 9,6 % en peso de azufre y el crudo de Gela en Italia tiene un 7,8 % en peso de azufre.

El origen del contenido de azufre en el crudo proviene principalmente de la descomposición de residuos orgánicos. Posteriormente, debido al tiempo y a la temperatura de su enterramiento, aparece el azufre bajo la forma de H_2S . Además, debido a la presencia de la acción de bacterias del tipo *desulforibrio desulfuricans* se origina también H_2S .



El hidrógeno proviene del crudo y los iones sulfatos están presentes en las rocas del yacimiento.

El H_2S así formado puede reaccionar sobre los sulfatos o los componentes de la roca almacén para formar azufre, que queda en suspensión o que, según las condiciones de presión, de temperatura y del periodo de formación del yacimiento, puede reaccionar con los hidrocarburos para dar los compuestos sulfatados.



El azufre que se encuentra presente en los crudos y derivados causa serios perjuicios; no sólo la contaminación del medio ambiente debida a los gases de combustión, en los que aparece como SO_2 o SO_3 , sino también porque envenena los catalizadores usados en los tratamientos químicos de las refinerías y además, es responsable en gran medida de las corrosiones que se producen en los equipos.

Por otra parte, a diferencia del azufre, el nitrógeno se encuentra en menores proporciones en la mayoría de los crudos más comercializados no llegando a superar al 0,25% en peso del total. En los combustibles, el nitrógeno puede existir en forma de aminas y en componentes aromáticos. Por cada 0,1% de nitrógeno contenido en el combustible, se producen en el motor diésel aproximadamente 0,6 g/kWh de NO_x [32].

Nombre del crudo	% S	% N
Kirkuk	2,00	0,10
Kuwait	2,5	0,15
Gash Saran	1,6	0,23

Tabla 2-4 Contenido en nitrógeno y azufre de algunos crudos [31]

2.3.2 Tipos de combustibles marinos

Se origina con la mezcla en las refinerías de hidrocarburos procedentes del refino del petróleo, con sustancias aditivas que se añaden para mejorar sus cualidades y propiedades [28]. En líneas generales existen dos tipos:

- Combustible residual: también denominado como Marine Fuel Oil (MFO) o fuelóleos. Constituye la fracción más pesada del proceso de refino del crudo y es el producto de mayor viscosidad que queda después de extraer la gasolina, gasóleo, propano, butano, nafta, aceites lubricantes...etc. Existen varios tipos de fuel en función de su viscosidad y contenido en azufre. Además, también existen fueles intermedios (IFO) que se obtienen mezclando fuel con destilados (gasóleos o diésel) de tal manera que según la viscosidad deseada se añadirá al fuel más o menos producto destilado. Además, se distinguen dos tipos de fuelóleo dependiendo del contenido de azufre que tengan:

- LSFO (Low Sulphur Fuel Oil): tiene un contenido máximo de azufre del 1 por ciento.
- HSFO (High Sulphur Fuel Oil): tiene un contenido máximo de azufre del 3,5 por ciento.

- Combustible destilado: también conocido comúnmente como “gasóleo” o “diésel”. Éste es una mezcla de diferentes destilados intermedios derivados del proceso de refinación del petróleo crudo. Por lo general, está compuesto de gasóleo ligero y pesado, aceite de ciclo ligero y pesado, así como gasóleo de vacío. Se distinguen dos grupos, MGO (gasoil marino) y MDO (diésel marino) diferenciándose entre sí principalmente por sus densidades, viscosidades, así como su contenido de azufre [33].

- MGO: el gasoil marino es un combustible marino para uso marino que debe estar libre de trazas de fuel. Posee un contenido relativamente bajo de azufre. Es un excelente combustible para motores diésel que operan bajo condiciones de alta exigencia.
- MDO: el diésel marino se le permite tener rastros de combustible residual, que pueden ser altos en azufre.

En la Armada Española, existen tres combustibles destinados a la propulsión de los buques cuyas características principales serán descritas posteriormente en el 4.1.1. Éstos son:

- DFM F76 (de acuerdo a la MIL-DTL-16884 P).
- Gasóleo B (de acuerdo al Real Decreto 67/2006 de 31 de enero).
- DMA (de acuerdo a la ISO 8217 de 2017).

2.4 Emisiones contaminantes producidas por los motores diésel

Durante el funcionamiento del motor diésel se expulsan una serie de gases contaminantes a la atmósfera. En la Figura 2-26 se reflejan los reactivos y productos de esta combustión para una relación aire:combustible donde g/kW-h es el consumo específico del motor.

El control de las emisiones contaminantes en los motores en la actualidad es uno de los factores a considerar más importantes. Principalmente, las sustancias más contaminantes son los hidrocarburos sin quemar o parcialmente quemados (aldehídos, alcanos, alquenos, etc.) y los óxidos de nitrógeno (NO_x),

monóxido de carbono (CO), los óxidos de azufre (SO_x) y gases que contribuyen al efecto invernadero como el dióxido de carbono [34].

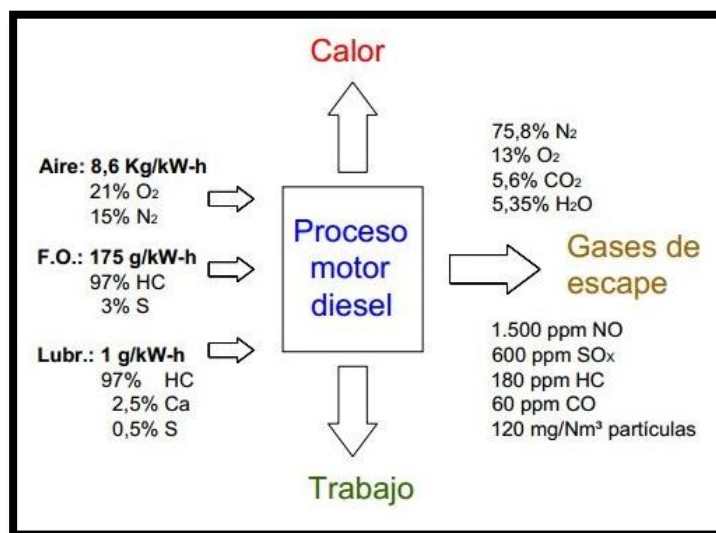


Figura 2-26 Emisiones típicas de un motor MAN B & W diésel lento [34]

Los óxidos de azufre son un grupo de gases formados por trióxidos de azufre (SO₃) y dióxido de azufre. El más común es el SO₂, ya que el SO₃ es solo un intermediario en la formación del ácido sulfúrico (H₂SO₄) [35].

Los SO_x son gases contaminantes que una vez dispersado en el medio ambiente pueden causar diversos efectos negativos. Mezclados con la lluvia, se llega a transformar en ácido sulfúrico y origina la denominada “lluvia ácida” provocando la destrucción de bosques, vida salvaje y la acidificación de las aguas superficiales.

En el ser humano, la inhalación de concentraciones elevadas de SO₂ puede ocasionar problemas de salud ya que es un gas irritante y tóxico que afecta sobre todo las mucosidades y los pulmones. Un estudio sobre los efectos en la salud humana de las emisiones de óxido de azufre procedentes de los buques, presentado al Comité de protección del medio marino (MPEC) en 2016 estimó que, de no reducir los límites de óxidos de azufre procedentes de los buques en 2020, la contaminación atmosférica de los buques contribuiría a más de 570.000 muertes prematuras en todo el mundo en el periodo de 2020 a 2025 [36]. Así que se puede decir que una reducción en el límite de óxidos de azufre procedentes de los buques tendría beneficios tangibles para la salud, particularmente para las poblaciones cercanas a puertos y a las rutas principales del transporte marítimo en África, América Latina y en Asia Pacífica .

Algunas veces se ha tachado al transporte marítimo de mercancías, incluso equivaliendo que unos pocos de buques utilizando un fuelóleo con un contenido elevado en azufre contaminarían lo mismo que toda la flota automovilística mundial con el combustible más limpio posible. Sin embargo, este tipo de transporte es el que presenta mayor eficiencia energética.

Los NO_x son un grupo de compuestos químicos que cuando se combinan producen una serie de riesgos perjudiciales para la salud humana. En los motores diésel, la cantidad emitida de NO₂ puede llegar a alcanzar valores comprendidos entre un 10% y un 30% de las emisiones totales de NO_x. Engloban tanto al monóxido (NO) como al dióxido de nitrógeno (NO₂). De las dos, es ésta última la principal forma con efectos adversos sobre la salud; además, el NO se oxida con facilidad, dando lugar a NO₂ rápidamente una vez presente en la atmósfera.

Dichos efectos adversos son de muy diversa naturaleza, y se pueden producir sobre la salud humana y sobre el medio ambiente (acidificación y eutrofización de ecosistemas, afecciones metabólicas,

limitación del crecimiento vegetal). Los procesos de acidificación pueden también afectar a las edificaciones.

Por otra parte, los NO_x contribuyen igualmente de forma secundaria a la formación de partículas inorgánicas (por ser precursores del ácido nítrico, HNO₃, y por tanto del nitrato, NO₃ en partículas), y de otros contaminantes fotoquímicos (por ejemplo, al reaccionar con compuestos orgánicos volátiles, COV's) lo que potencialmente agrava las consecuencias mencionadas sobre la salud y el medio ambiente y conlleva efectos sobre el clima [37]. Además, el monóxido de nitrógeno participa en la reducción de ozono en la estratosfera facilitando así el paso de la radiación solar ultravioleta hasta la superficie terrestre. Además, aunque en una proporción bastante menor, se pueden crear emisiones de N₂O, que tienen un elevado poder como gas causante del efecto invernadero. Sin embargo, los mecanismos que explican su formación no se conocen todavía con precisión [32].

En cuanto a los óxidos de carbono, los principales son el monóxido de carbono (CO), y el dióxido de carbono (CO₂). En motores diésel, en los cuales el proceso de combustión es heterogéneo, existen dos fuentes principales de CO. La primera de ellas la constituyen zonas excesivamente pobres que no son capaces de soportar una rápida combustión, pues la llama no puede propagarse a través de ellas y se forman productos procedentes de la pirolisis y oxidación parcial del combustible. La segunda fuente se corresponde con zonas excesivamente ricas que no son capaces de mezclarse con la suficiente cantidad de aire para producir la oxidación completa del combustible [38]. Por otra parte, el dióxido de carbono es producido por la combustión completa del carbono [39]. De los gases reconocidos como los máximos contribuyentes al efecto invernadero éste es uno de los más significativos aunque existan otros gases como el metano o el óxido nitroso que poseen mayor potencial molecular de calentamiento global. El CO es una sustancia altamente tóxica en la salud mientras que el dióxido de carbono se encuentra de forma natural en la naturaleza, pero en altas concentraciones tiene un papel fundamental en el efecto invernadero.

La materia particulada es un término genérico, para una clase amplia de diversas sustancias físicas y químicas presentes en los gases de salida que se encuentre en estado líquido en condiciones aproximadamente ambientales. Puede ser caracterizado como partículas discretas que existen en fase líquida o sólida, que abarcan varios órdenes de magnitud en tamaño.

Las partículas finas son producidas principalmente por los procesos de combustión y por las transformaciones de las emisiones gaseosas (por ejemplo, SO_x, y NO_x) en la atmósfera. Las propiedades físicas y químicas pueden variar en gran medida en dependencia de la región y la meteorología. Por lo tanto, puede incluir una mezcla compleja de diferentes contaminantes incluyendo sulfatos, nitratos, compuestos orgánicos, carbono elemental y compuestos metálicos; estas partículas pueden permanecer en la atmósfera durante días o semanas y viajar a través de cientos de miles de kilómetros en la atmósfera. Estas partículas sólidas se producen por una combustión incompleta.

La falta de aire o el exceso de combustible incrementan su formación. Su formación también depende de la calidad del combustible empleado. A la hora de analizar estas emisiones es imprescindible estudiar el proceso de dilución del escape con el medio ambiente [38]. Una característica reseñable sobre el aerosol (conjunto de partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas) es que pueden sufrir cambios en sus características físicas y químicas debido a distintos procesos tales como sedimentación, evaporación, procesos fotoquímicos, etc. Estos procesos pueden ocurrir tanto en la línea de escape como en el momento de dilución en la atmósfera.

Las partículas que están limitadas por las diferentes normativas mundiales son aquellas que resultan de alguno de los procesos atmosféricos mencionados anteriormente, tanto en el escape como ya directamente en la atmósfera. Los HFO (Heavy Fuel Oil) son combustibles altamente generadores de estos compuestos a diferencia de los MDO (Marine Diesel Oil) y los combustibles gaseosos. La OMI no especifica límites de emisión para estas partículas, la prevención de contaminación queda regulada a

partir de la calidad del HFO y por ello se rige por la misma normativa que las emisiones de los óxidos de azufre.

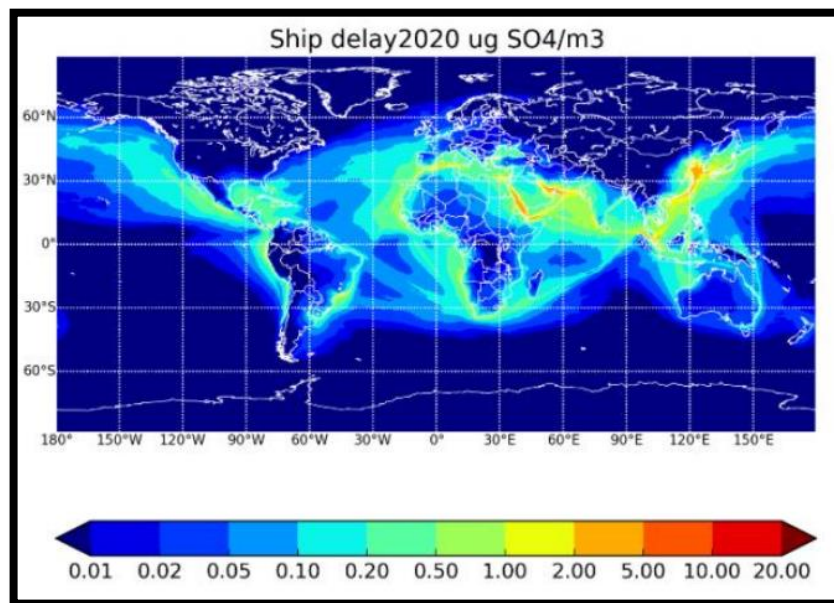


Figura 2-27 Mapa mundial de emisiones en un escenario sin Convenio MARPOL [40]

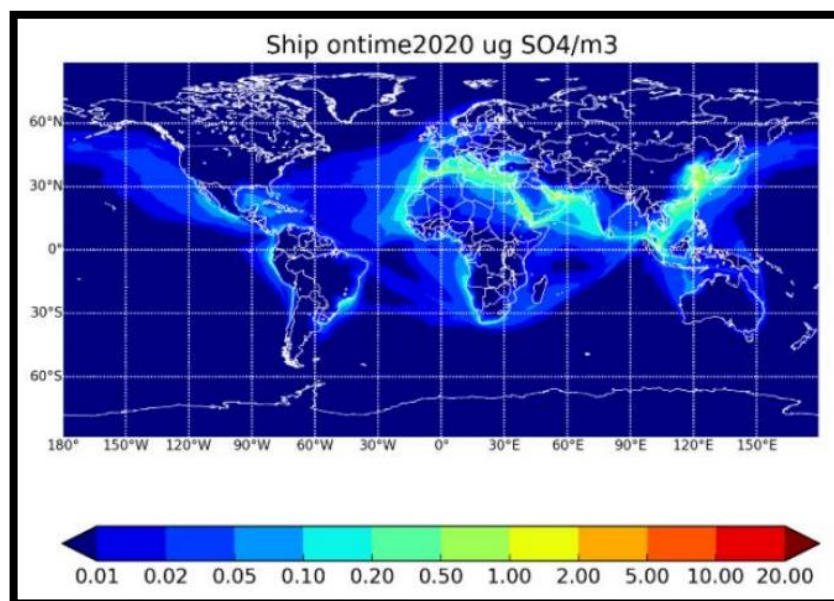


Figura 2-28 Mapa mundial de emisiones en un escenario con Convenio MARPOL [40]

En las Figura 2-27 y Figura 2-28 se muestran la distribución espacial de concentración de sulfatos en la atmósfera a nivel de la superficie terrestre comparando dos escenarios distintos, una foto en la cual no existe Convenio MARPOL (Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los buques) y otra en la que si se aplican las restricciones que establece el convenio [40]. Los resultados están dados en microgramos por metro cúbico.

Una vez descritas las diferentes sustancias que conforman los gases de escape de los motores diésel, se analizan las causas por las que se forman en particular los NO_x y los SO_x .

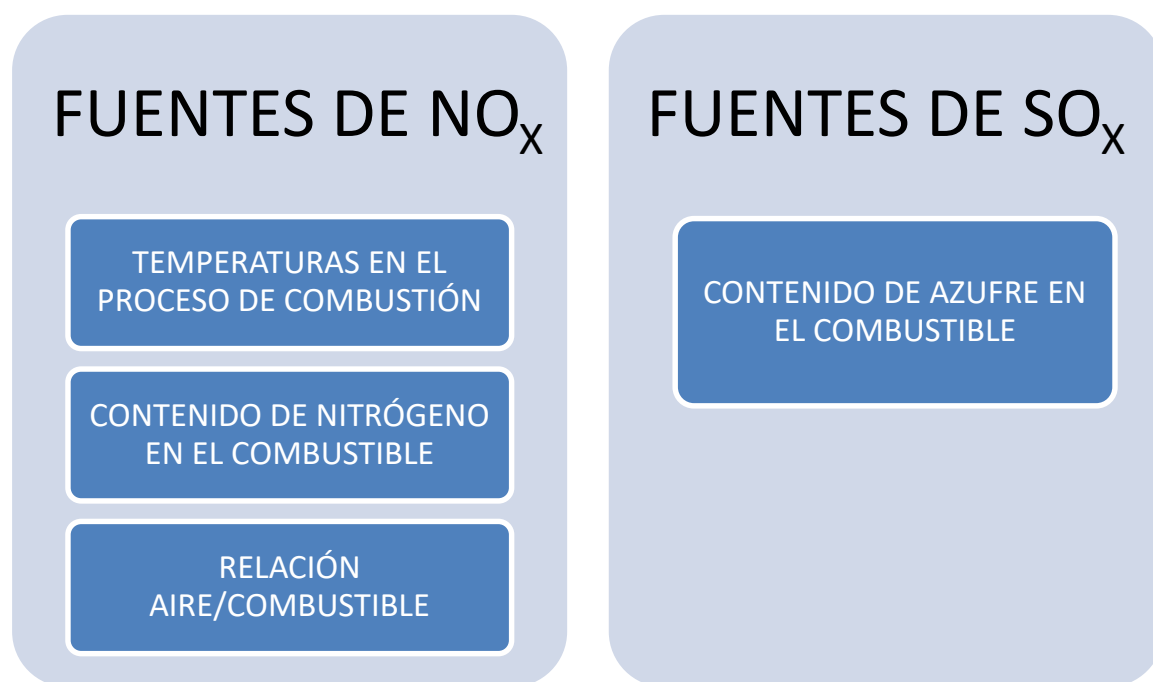


Figura 2-29 Resumen de las fuentes de emisiones (Autoría propia)

Las emisiones de NO_x se deben principalmente a las temperaturas alcanzadas en la mezcla de gases procedentes de la combustión a lo largo del proceso, a mayor temperatura se produce una mayor formación de NO. Por otra parte, se pueden encontrar compuestos de nitrógeno en el combustible. Sin embargo, debido al bajo contenido que puede llegar a presentar el combustible es una causa irrelevante en comparación con las demás. Por último, la relación aire/combustible ya que en zonas de la cámara de combustión donde existen mezclas muy ricas en combustible y altas temperaturas conlleva a la producción de emisiones de NO_x, pero tampoco es una causa relevante en comparación con la temperatura en el proceso de combustión.

Las emisiones de SO_x se producen por diversas reacciones cuando el combustible reacciona en la cámara de combustión. Por lo tanto, la mejor manera para controlar las emisiones de SO_x es minimizando la cantidad de azufre presente en el combustible.

3 SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES

Existen diferentes técnicas para reducir las emisiones contaminantes de los motores diésel en función de donde se aplique la tecnología o el proceso de reducción de compuestos contaminantes. Se realiza un estudio de cuantas posibilidades existen en la actualidad para posteriormente analizar cuáles serían las más idóneas para los sistemas de propulsión de los buques de la Armada española y cuáles serían las económicamente más viables. De manera general, se distinguen distintos tipos de técnicas para reducir la contaminación producida por los motores de combustión diésel:

- Tratamientos para reducción de elementos contaminantes en el combustible: se estudiará principalmente aquellos procesos que eliminan el contenido de azufre presente en el combustible. Esto es debido a que la principal fuente de emisiones de óxidos de nitrógeno no reside en el combustible en sí, ya que éste contiene cantidades mínimas de nitrógeno.
- Combustibles alternativos: en este apartado se analizan y describen de una manera concisa aquellos combustibles que podrían presentarse como alternativas para sustituir a los combustibles actuales en uso en la Armada.
- Tecnologías que afectan al diseño del motor: en este apartado se estudiarán las medidas que suponen una considerable reducción de óxidos de nitrógeno.
- Postratamiento de gases de escape: existen multitud de sistemas de postratamiento debido a la gran innovación tecnológica que se ha producido debido a las restricciones impuestas por los reglamentos y convenios incluyendo la influencia que tiene el sector automovilístico en este tema. Hay multitud de ellos: catalizadores de tres vías; trampas de regeneración continua; filtro de partículas; oxidación de NO a NO₂, HC y CO (sistemas DOC). Todos estos sistemas son bastante conocidos y su eficacia ha sido más que probada. Sin embargo, el estudio se centrará en los sistemas que ayuden a disminuir principalmente las emisiones de NO_x y SO_x

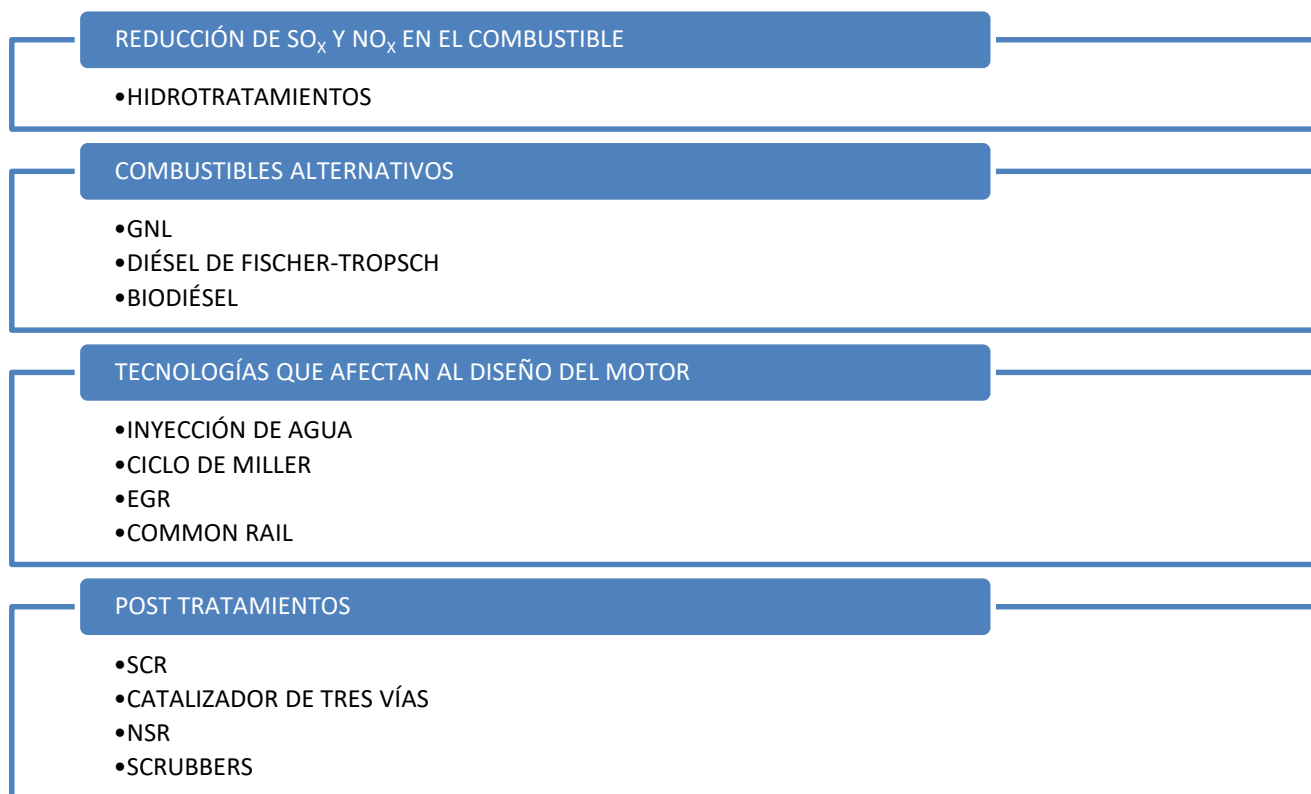


Figura 3-1 Esquema resumen sobre los distintos sistemas (Autoría propia)

3.1 Tratamientos para la reducción de NO_x y SO_x en el combustible

3.1.1 Hidrotratamientos

Actualmente, en sectores tales como el transporte marítimo y el automotriz existe una tendencia hacia el uso de combustibles con bajo contenido en azufre. La industria de refinación está desarrollando e investigando sobre catalizadores y procesos que permitan la remoción del azufre y reducir el coste económico asociado a ello. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos encontró que los beneficios ambientales y en la salud humana asociados a la reducción de azufre fueron diez veces más elevados que los costos. Además, un estudio europeo demostró que los combustibles de ultra bajo azufre reducen significativamente los costos totales, incidiendo directamente en un mayor rendimiento del combustible. No obstante, la inversión requerida en refinación es significativa por lo que podría acarrear en el precio de los combustibles [41].

El hidrotratamiento es uno de los métodos más comúnmente usados en la industria de refinación del petróleo para la remoción de los compuestos de azufre, nitrógeno, oxígeno y metales pesados en los combustibles fósiles como la gasolina y el diésel usados en los motores de combustión. En la década de 1980 cobró especial importancia debido a la influencia de las restricciones ambientales, ya que suponía una herramienta muy importante para cumplir las especificaciones relacionadas con el contenido de azufre. Por ejemplo, en Perú se construyó una refinería que posee capacidades para generar diésel con bajos contenidos de azufre en 2016 promoviendo de tal manera el uso de estos procesos a gran escala [42]. Existen hidrotratamientos tanto para los compuestos de azufre como para los compuestos de nitrógeno, hidrodesulfuración (HDS), hidrodesnitrogenación (HDN) e hidrodesaromatización (HDA). Aunque los procesos difieran, los compuestos organonitrogenados reaccionan con hidrógeno en presencia un catalizador a condiciones severas de presión y temperatura [19]. Los catalizadores más comunes utilizados en el hidrotratamiento son:

- Cobalto – Molibdeno: consigue una buena remoción del azufre pero pobre remoción de nitrógeno.
- Níquel – Molibdeno: consigue una buena remoción de nitrógeno pero pobre remoción de azufre.
- Níquel – Wolframio: buena remoción de azufre y nitrógeno.

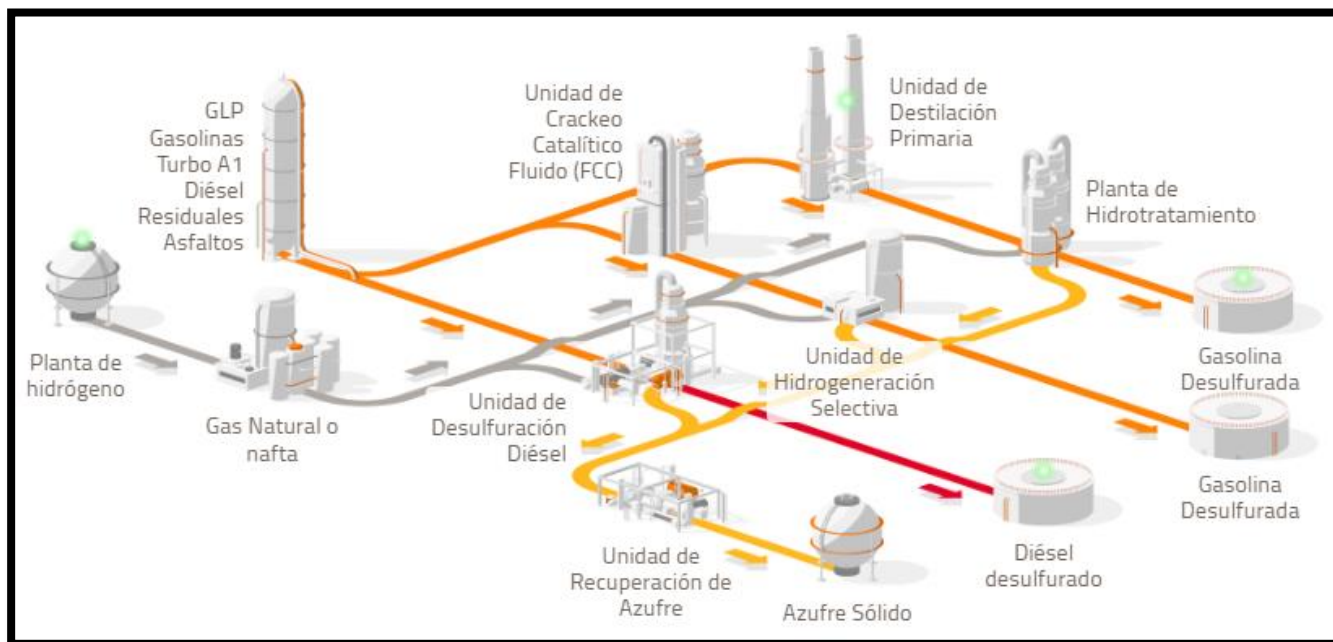


Figura 3-2 Esquema de la refinería peruana "La Pampilla" [42]

El tipo de catalizador que se utiliza depende del objetivo principal del proceso ya que la reacción puede dirigirse selectivamente al producto o los productos deseados.

La Figura 3-2 corresponde a la refinería “La Pampilla” de la empresa Repsol en la cual se producen combustibles bajos en azufre. Según la página web, la totalidad de las gasolinas que se produce contienen menos de 50 partes por millón. Además, el azufre extraído se recupera en estado sólido en las nuevas plantas para ser usado en agricultura o industria.

Las condiciones de operación que se establecen en el hidrotratamiento son función tanto del origen y propiedades de las cargas como del objetivo del proceso. Las condiciones que normalmente se fijan, ya que influyen considerablemente en el buen funcionamiento tanto del catalizador como de la planta son: temperatura, presión parcial del hidrógeno, velocidad espacial (LHSV) y la relación hidrógeno-hidrocarburo. Estas no se seleccionan en forma independiente si no en forma conjunta para lograr una operación óptima

El propósito de la hidrodesulfuración, uno de los tratamientos más comunes, consiste en la eliminación del azufre para cumplir las especificaciones de los combustibles. Pero en el proceso se producen otra serie de reacciones colaterales que en algunos casos también deseadas. El objetivo de este proceso es la saturación de los compuestos aromáticos presentes para romper el enlace C-S o C-N mediante la adición de H_2 . La temperatura a la que se lleva a cabo ronda $320^{\circ}C$ y 40 kg/cm^2 . La conversión se efectúa en un reactor en el cual interviene el catalizador de hidrógeno que trata y satura la fracción de petróleo que ingresa, obteniendo así hidrocarburos no azufrados y ácidos sulfhídrico [43].

El nivel de hidrodesulfuración depende de varios factores, entre ellos la naturaleza de la fracción de petróleo a tratar (composición y tipos de compuestos de azufre presentes), de la selectividad y actividad del tipo de catalizador utilizado (concentración de sitios activos, propiedades del soporte, etc.) y del diseño del proceso. Es importantes señalar que el H_2S producido durante el proceso debe ser continuamente extraído porque es un inhibidor de las reacciones de HDS y envenena el catalizador. El

catalizador es una sustancia que no interviene químicamente en la reacción, pero la acelera. El catalizador facilita que se realice la reacción correctamente formando compuestos intermedios [31].

La disminución de la cantidad de azufre no sólo supondría una reducción del efecto contaminantes sobre el medio ambiente, además, hay que tener en cuenta el daño causado por compuestos de azufre a los motores. La presencia de azufre es la causa de aparición de corrosión en el motor, tanto a bajas temperaturas como a altas temperaturas, incluso en el cárter, ya que, por efecto de la condensación del vapor de agua en tiempo frío, el ácido formado puede afectar al engrase. El mejor sistema para evitar corrosiones, a bajas y altas temperaturas es efectuar la combustión estequiométrica, ya que se minimizan las pérdidas de energía por el combustible no quemado, el calor de los gases de combustión y se reduce la producción de contaminación atmosférica por hidrocarburos sin quemar o parcialmente quemados producidos por una combustión incompleta además de otras partículas tales como monóxido de carbono, óxidos de azufre y gases que contribuyen al efecto invernadero [33].

El principal problema es la obtención del hidrógeno, ya que es un recurso caro de obtener que influirá proporcionalmente en la cantidad final de combustible purificado. El hidrógeno es un elemento que no puede ser obtenido en estado puro en la naturaleza, por lo que es necesario producirlo a partir de otros compuestos y utilizar para ello distintos procedimientos. Además, para obtener hidrógeno mediante reformado, que es uno de los métodos más comunes, se produce CO₂ [44]. No obstante, este método posee buena aplicabilidad para el procesamiento de crudos pesados con alto contenido de azufre.

Actualmente, el desarrollo en el hidrotratamiento para su innovación se basa en la optimización de los procesos existentes. La optimización de este proceso se basa en nuevas formulaciones de catalizadores que aumentan la actividad catalítica de la hidrodeshulfuración, mejoras en las condiciones de reacción del proceso y diseño de nuevas configuraciones de los reactores.

3.2 Combustibles alternativos

3.2.1 GNL (*Gas Natural Licuado*)

El GNL es un gas natural en fase líquida con una composición química de 98% de metano, 0'9% de nitrógeno, 0'8% de etano, 0'2% de propano y 0'1% de dióxido de carbono [45]. Se almacena y transporta en recipientes altamente aislados para mantener su estado líquido, que se consigue a una temperatura de -160°C. El GNL se condensa gracias a la licuefacción, que es el enfriamiento de un gas hasta que alcanza la temperatura de condensación, en este de -160°C, quitando entonces el calor latente de vaporización.

El Gas Natural es un combustible fósil puro y limpio por lo que provoca un menor impacto ambiental. Se presenta además como una buena alternativa para reducir costes económicos ya que su coste por kilómetros es un 30% más económico en relación al gasóleo, un 50% menor en comparación con la gasolina y un 20% menor que el GLP (gas licuado del petróleo) [46].

Por otro lado, la combustión produce una cantidad mínima de emisiones contaminantes respecto a otros combustibles como el diésel. Como se puede ver en la Figura 3-3 la reducción de emisiones es bastante significativa.

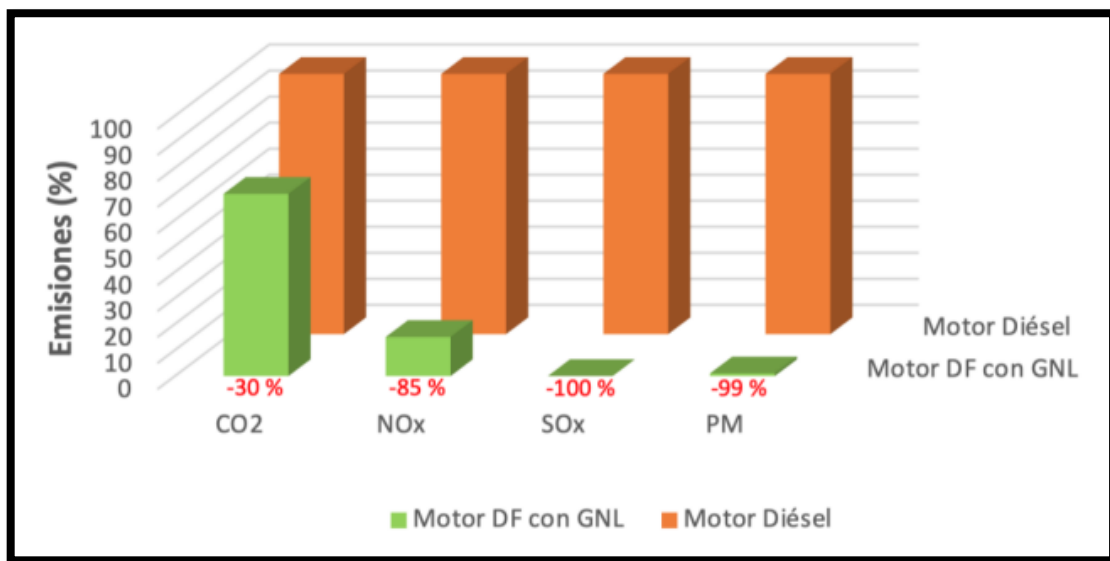


Figura 3-3 Gráfica comparativa de emisiones entre combustible diésel y GNL [45]

Uno de los factores más importantes a tener en cuenta es el motor que va utilizar la plataforma que quiera usar el GNL como combustible. En la actualidad, ya existen buques que operan con este combustible, en particular, aquellos que navegan principalmente por zonas de control de emisiones debido a las bajas emisiones que produce el GNL.

Sin embargo, al ser un combustible fósil se considera como energía no renovable. De tal modo, el GNL podría presentarse como una buena alternativa para un futuro a medio plazo pero no representa una medida definitiva y resolutive para sustituir al diésel. Existen empresas que fabrican motores que permiten trabajar con combustible diésel y GNL. En el sector civil, la empresa Fred Olsen adaptó el motor de propulsión Caterpillar 3618 para que pudiera ser propulsado tanto por gas natural licuado como por combustible diésel [47].

3.2.2 Biodiésel

El biodiésel es un combustible líquido que se obtiene a partir de aceites vegetales y grasas animales reconocidos como materias renovables. Representa una de las alternativas factibles para reemplazar el diésel ya que está considerado como una fuente renovable. Además, puede ser empleado en cualquier

motor diésel con una serie de adaptaciones, consiguiendo una reducción de emisiones de monóxidos de carbono, óxidos de azufre, hidrocarburos aromáticos y partículas sólidas.

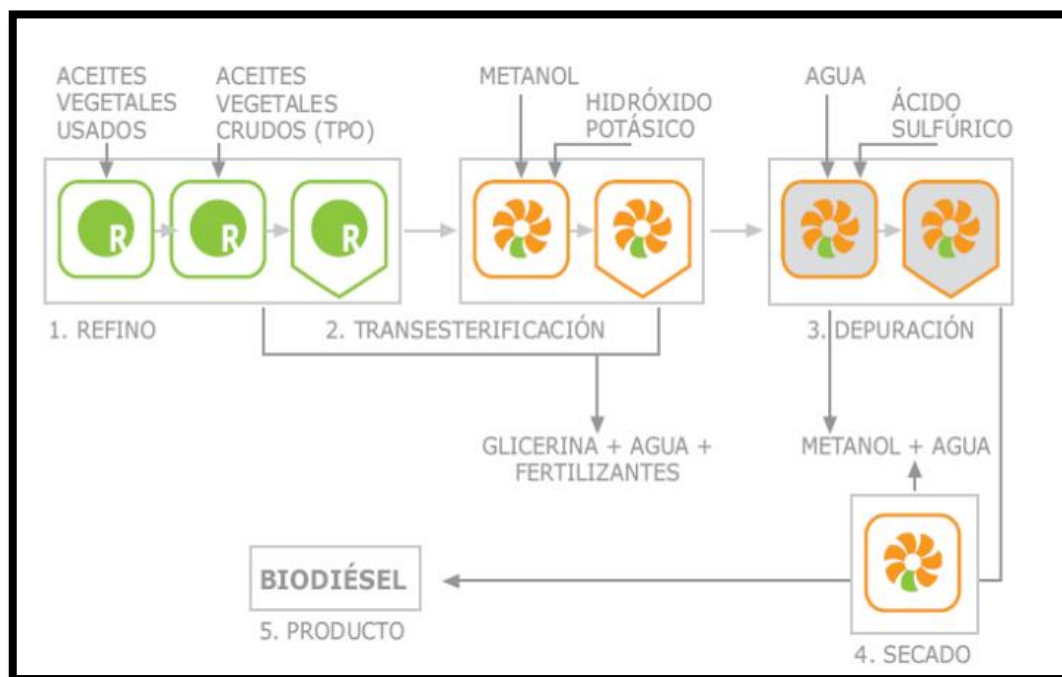


Figura 3-4 Esquema de las principales etapas de producción de biodiésel [48]

La transesterificación es el proceso en el cual se transforman químicamente los aceites vegetales para reducir los problemas que causaría el uso directo en el motor debido a la naturaleza viscosa de los aceites. Por lo tanto, los aceites requieren de un acondicionamiento previo a su utilización [48].

En un trabajo realizado por el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría, se realizaron experimentos con dos motores de combustión interna, uno trabajando con combustible biodiesel y otro con combustible diésel. Se concluyó lo siguiente:

- Los motores que usaron biodiesel consumió más combustible y su potencia efectiva y torque efectivo se vieron disminuidos.
- Se compararon las emisiones de nitrógeno creadas por ambas motores y no se presentaron grandes diferencias [49].

El biodiésel puede ser utilizado en conjunto con diferentes concentraciones con el diésel de petróleo. Sin embargo, debido a que su producción depende de aceites combustibles vírgenes el precio resulta una desventaja frente al diésel convencional [50]. Por lo tanto, económicamente el biodiésel no representa una solución rentable.

3.2.3 Diésel de Fischer-Tropsch

El proceso de conversión catalítica Fischer-Tropsch poder ser usado para sintetizar combustibles diésel. Este proceso consiste en la conversión de fracciones de carburantes sintéticos formadas por monóxidos de carbono e hidrógenos en hidrocarburos ligeros (gasolina, queroseno y gasoil) por medio de un catalizador metálico [51]. Estos tipos de combustibles pueden presentar contenidos muy bajos de azufre y compuestos aromáticos. Además, no es necesario implantar modificaciones en el motor para usarlo. En diversos estudios se ha comprobado que su uso ha proporcionado una reducción de un 12 % de emisiones de NO_x y un 24 % menos de emisiones de materia particulada.

Sin embargo, existen casos en los que se ha producido una ligera disminución en torno al 5 % de niveles de par suministrados por el motor con este combustible [52]. Además, el proceso en sí es costoso por lo que no se ha experimentado el completo desarrollo de esta tecnología en el mercado.

3.3 Tecnologías que afectan al diseño del motor.

3.3.1 Inyección de agua en motores de combustión interna

Es un método en el cual se inyecta una mezcla de aire-agua en la cámara de combustión de manera que se logra una combustión eficiente a la vez que se minimicen las emisiones contaminantes. Este novedoso método que se introdujo en el mundo de la investigación del motor allá en los años 40 del siglo pasado, es aplicable en motores diésel. El objetivo es obtener una mezcla de aire, combustible y agua en la cámara de combustión consiguiendo consecuentemente una serie de efectos gracias a la transformación del agua en vapor: se disminuye la temperatura en la cámara de combustión y por consiguiente se ingresa mayor cantidad de combustible mejorando la potencia cuando aumenta la carga; aumenta la relación de compresión mejorando la combustión, permite también que se forme menos óxidos de nitrógeno disminuyendo la contaminación ambiental, y por otro lado también disminuir la cantidad de CO_2 . La disminución de la temperatura se consigue gracias al alto grado de evaporización que posee el agua, es decir, para cambiar de estado de líquido a vapor, el agua necesita un aporte considerable de calor.

Existen diversos métodos de inyección de agua que fueron probados por varios experimentos en función del tipo de motor y las prestaciones buscadas:

- Método de inyección en el conducto de admisión de aire: el agua se inyecta a través del conducto de admisión del aire cuando el pistón se encuentra en el punto muerto superior del cilindro. Además, el agua se inyecta controladamente para evitar una humedad excesiva en la mezcla. El motor debe incorporar un sistema independiente de inyección mediante una bomba auxiliar que se acciona por el cigüeñal del motor. Para estimar un grado de ganancia, aproximadamente el motor reduce las emisiones de NO_x en un 30%, para una relación de agua/combustible del 0,5 pudiendo llegar a una reducción del 40% utilizando otras proporciones. Esta tecnología ha sido creada incluso para optimizar automóviles de altas prestaciones, como es el caso del BMW M4 GTS, que posee un sistema de inyección de agua destilada en el conducto de admisión [53].

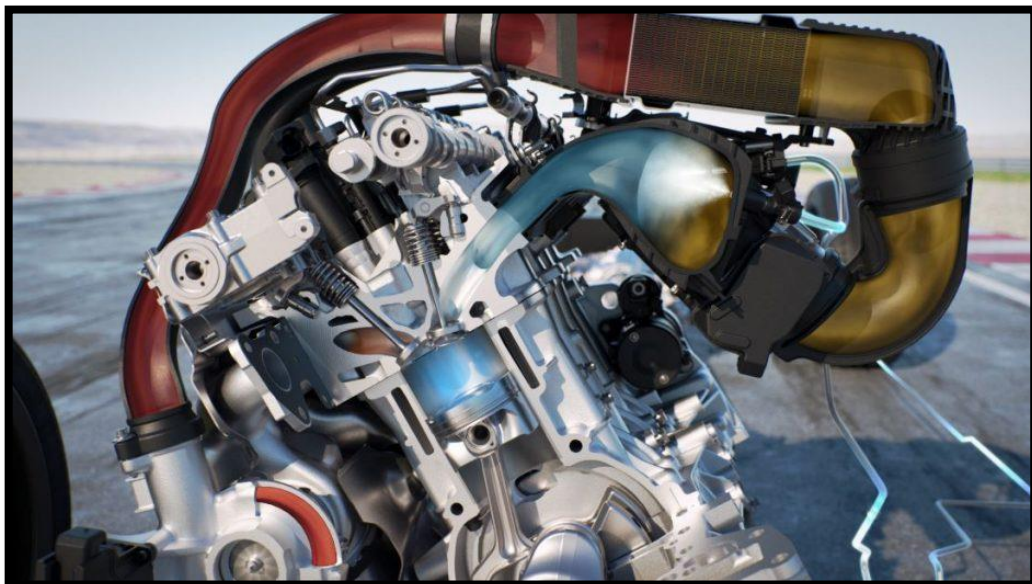


Figura 3-5 Motor de seis cilindros con tecnología M TwinPower Turbo [53]

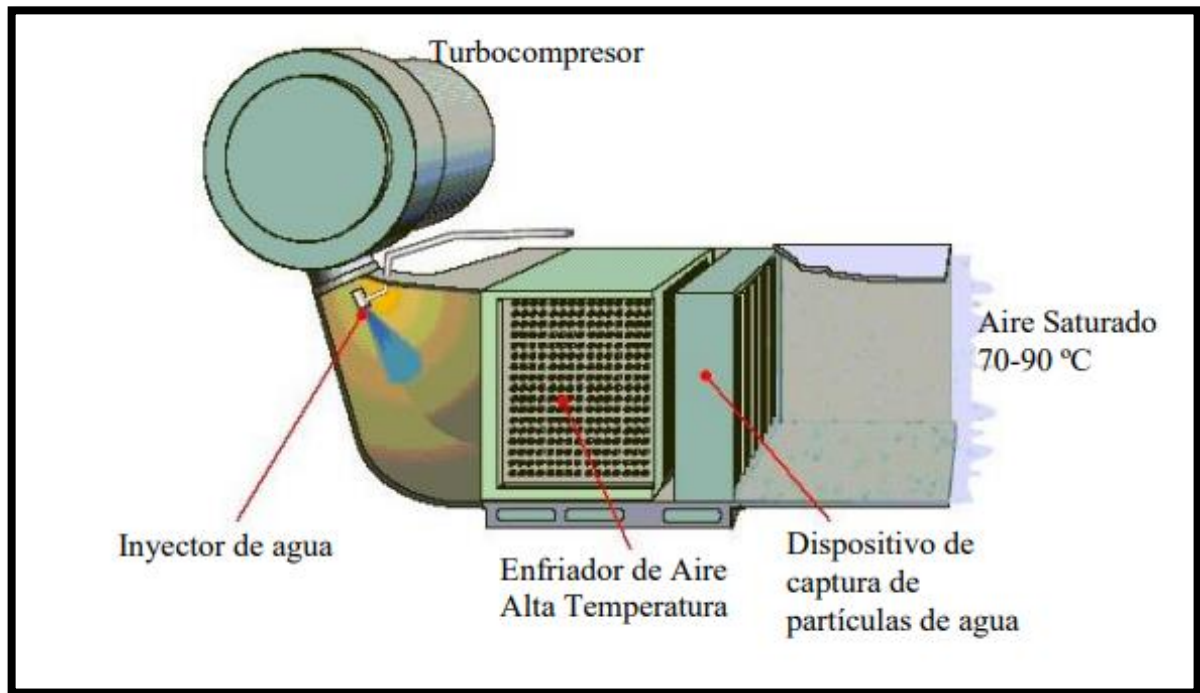


Figura 3-6 Esquema de adición de agua al aire de admisión [32]

- Método de inyección de agua directa en el cilindro: se inyecta el agua en el cilindro por medio de una bomba que es accionada por el cigüeñal e inyectores independientes. Este método resulta ventajoso debido a que existe la posibilidad de variar la relación de agua/combustible, seleccionar el tiempo exacto en el que se realiza la inyección pudiéndose retrasar o adelantar en función de las especificaciones que se quieran conseguir obteniendo reducciones de NO_x sin aumentar las emisiones de cenizas y CO. La inyección puede ser controlada mediante la unidad de control del motor que permite realizar un control electrónico sobre varios aspectos de la operación del motor. Además, el riesgo de autoinflamación del combustible en motores diésel debido al calor existente en la cámara de combustión por la alta compresión de la mezcla y las altas temperaturas disminuye gracias a que la inyección de agua junto con un buen diseño del pistón ayuda a aumentar la turbulencia y con ello homogeneizar la mezcla.

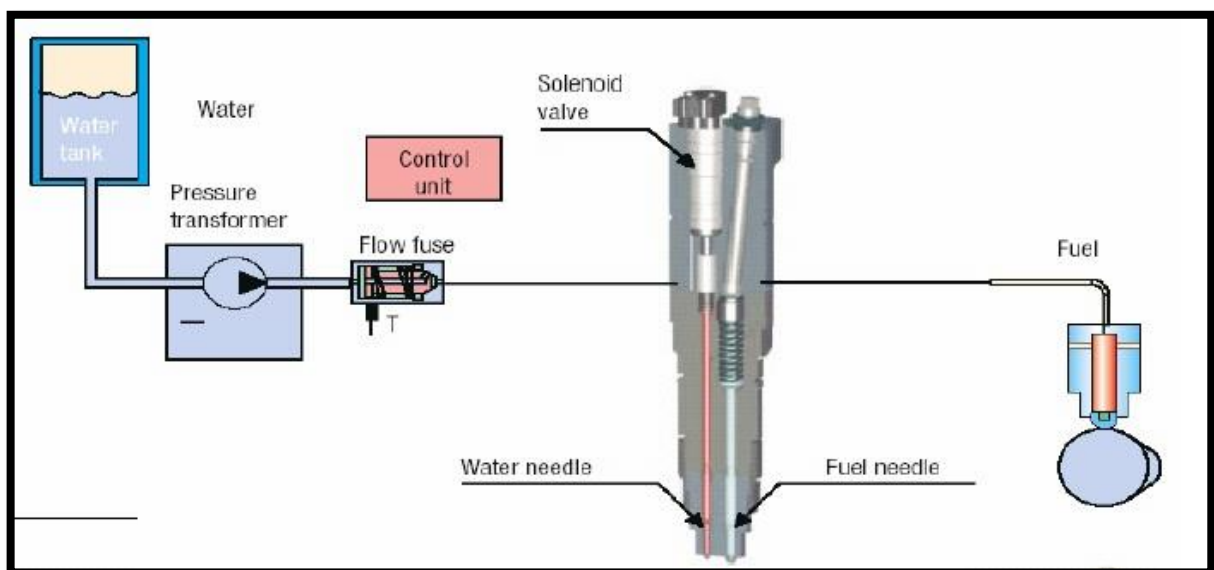


Figura 3-7 Esquema del método de inyección de agua directa en el cilindro [18]

- Método de inyección de agua directa al cilindro, mezclada con el combustible: el agua se mezcla con el combustible para crear una mezcla lo más homogénea posible a través del mismo inyector. Para lograr esta mezcla existen dos posibilidades: realizarla en un depósito intermedio en la proporción idónea o utilizar una bomba para el combustible y otra para el agua de manera que convergen antes del inyector. El inconveniente de este método es el control de la proporción de la cantidad de cada elemento que conlleva a llevar un sistema de control más complejo para controlar los caudales. Este es el método que consigue una considerable reducción de NO_x , además se observa que se reducen considerablemente las emisiones de CO y cenizas. Sin embargo, a medida que aumenta la proporción de agua/combustible se producen más productos que no combustionan tras la combustión por lo que el rendimiento se ve afectado. Para solucionarlo, se aumenta la relación de compresión del motor o del sistema de sobrealimentación. Existen estudios que especifican que con el uso de un emulsionante se puede potenciar aproximadamente un 10% de las prestaciones. La emulsión de combustible es la estabilización del agua u otra sustancia no miscible generalmente en diésel, con la finalidad de evitar una demulsificación. Sin embargo, cuando añadimos agua para la elaboración de las emulsiones provoca la disminución del valor calorífico del combustible reduciendo entre 4517 kJ/kg, respectivamente para las emulsiones con el 5% y 20% de agua. La viscosidad y la densidad en los combustibles emulsionados aumentan en función del agua añadida. La viscosidad que presenta el combustible emulsionado va a influir directamente en el patrón de pulverización, y producirá gotas mayores que serán quemadas con mayor dificultad en el momento de la combustión en el motor [54].
- Método de inyección de agua en el colector de escape: con este método se busca reducir las emisiones de NO_x . El agua se introduce en el cilindro por medio de la válvula de escape, recirculando también parte de los gases de escape que salen por el escape hacia la admisión, y mezclándolos con el aire fresco que se obtiene del colector de admisión. La recirculación de estos gases puede realizarse con la válvula EGR, con este método se consigue regular de manera más sencilla la temperatura maximizando su efecto debido a que siempre se encontrará en los rangos óptimos de temperatura. El sistema de Recirculación de Gases de Escape (EGR) tiene como objetivo la reducción de emisiones contaminantes por NO_x producidas por el proceso de combustión de los motores de combustión interna. Para ello, el sistema provoca la recirculación de pequeñas cantidades de gases de escape o gases inertes formados de CO_2 y H_2O (que no participan en la combustión) en el colector de admisión donde se produce la mezcla de combustible y aire a los cilindros de modo que la cantidad de oxígeno disminuye en el interior del cilindro [55]. Al proporcionar gases inertes al cilindro, la temperatura en el cilindro y la temperatura de llama se reducen. Por lo tanto, la combustión se produce de una manera más controlada, por lo que la cantidad de emisiones de NO_x expulsadas es menor [56].

- Humificación de la carga de aire: en este sistema el aire que entra por el colector de admisión es rociado con agua para saturarlo. Normalmente, se realiza la humidificación a la salida del compresor donde la temperatura del aire es alta. En la Figura 3-8 se refleja el esquema de este sistema que consta de un humidificador (“humidification tower”), un tanque de drenaje (“catch tank”), un sistema de reabastecimiento de agua y unidades de precalentamiento de la misma (“heat exchanger”) y un sistema de monitorización y control. El agua previamente calentada en un intercambiador de calor es introducida en la torre de humidificación donde se pulveriza sobre el aire comprimido (también de alta temperatura). Por lo tanto, en la conversión de fase de vapor de agua causada por el calor, se produce una disminución de la temperatura de la mezcla [57].

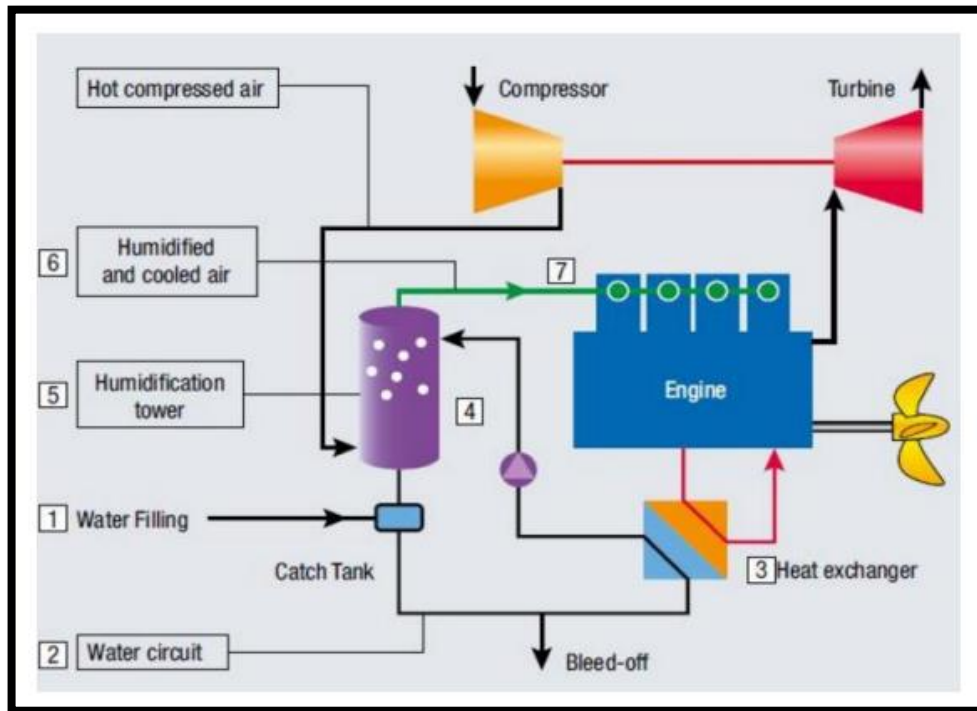


Figura 3-8 Esquema de un sistema de humidificación del aire de carga [57]

Según el tipo de motor, si se trata de un motor de encendido provocado (MEP) o un motor de encendido por compresión (MEC), la inyección de agua se usará de una manera diferente. En los motores MEP, el objetivo es reducir la temperatura de autoinflamación del combustible. Para los motores MEC que funcionan con diésel, las temperaturas que se asocian al proceso de combustión son mayores a diferencia del MEP ya que la relación de compresión es por norma general, el doble. Con la inyección de agua las emisiones de NO_x se logran disminuir entorno a un 70%. Sin embargo, a mayor cantidad de agua menos cantidad de NO_x, se produce un efecto negativo, la emisión de CO, de productos no combustionados o cenizas. Esto se produce debido a que el agua provoca el retraso de la ignición del combustible, por lo que los motores diésel tendrán que aumentar la reacción de compresión o utilizando sobrealimentación. Además, el consumo específico es mayor debido a que se produce menos potencia indicada si se compara con otro motor que no utilice la mezcla combustible-agua. Por otra parte, se consigue bajas las temperaturas de los gases de escape, lo que favorece el trabajo y duración de los sistemas de post-tratamiento en las últimas del escape. El sistema además, debe trabajar a cierto régimen de revoluciones para que sea eficiente [58].

3.3.2 Sistema EGR (Exhaust Gas Recirculation)

Como ya se ha comentado en el 3.3.1, el sistema de recirculación de fases de escape EGR es un elemento bastante conocido debido a su amplio uso en el empleo de la automoción. Este sistema fue creado allá en los años 70 debido a la alta contaminación que producían los motores diésel, por lo que los automóviles empezaron a llevarla de manera obligatoria debido a las políticas anticontaminación [59].

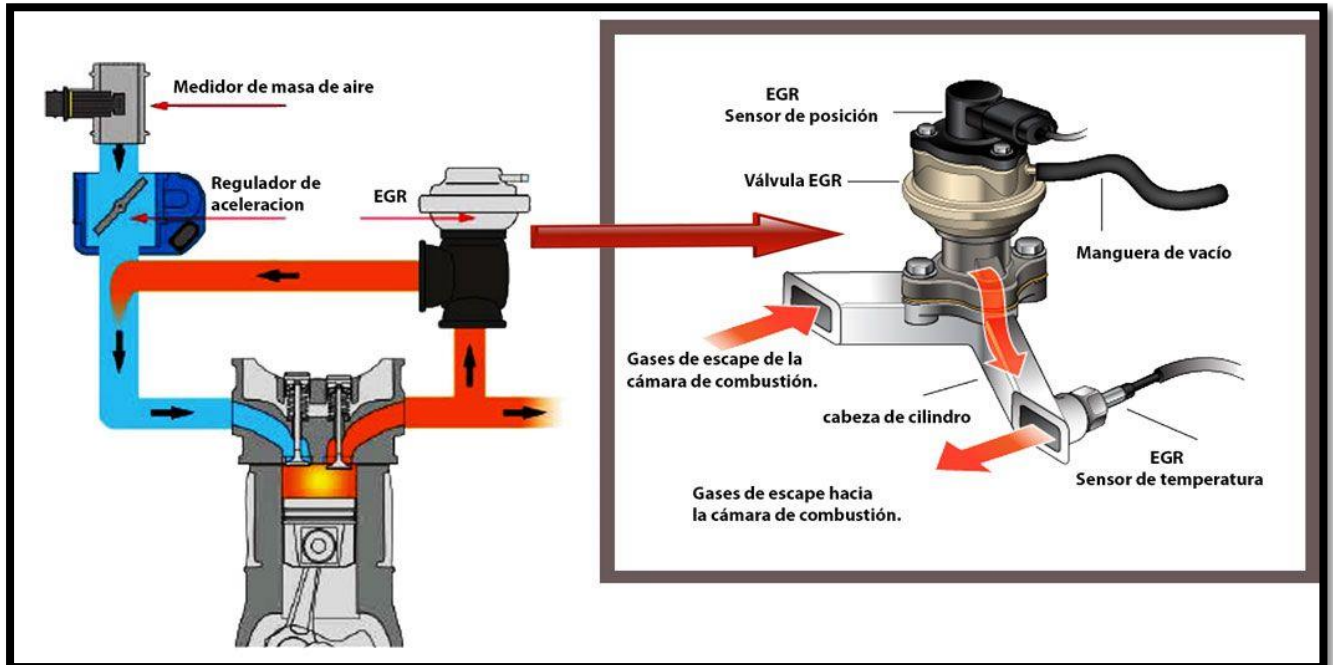


Figura 3-9 Esquema de sistema EGR [59]

El objetivo del sistema EGR fue explicado anteriormente en el método de inyección de agua en el colector de escape. En este apartado se concretará más sobre su funcionamiento y los tipos que se pueden encontrar.

El sistema modifica la composición de la masa admitida en el cilindro y de sus propiedades, de forma que el proceso de combustión se ve afectado en el sentido de evitar las condiciones de formación de NO_x . Aunque el gas de EGR actúa como un gas químicamente inerte durante la combustión, se producen algunos efectos favorables. Los efectos más importantes que se producen se resumen a continuación:

- Efecto de dilución: la presencia de gases quemados reduce la concentración de O_2 en el interior del cilindro. Esta reducción de la concentración de O_2 provoca que la mezcla aire-combustible y la combustión sea más lenta. De esta forma, el proceso de transmisión se lleva a cabo progresivamente de tal manera que existe una mayor transmisión de calor y se alcanzan menores temperaturas.
- Efecto térmico: la sustitución de O_2 y N_2 por CO_2 y H_2O presentes en los gases de escape. Éstos poseen mayor calor específico, por lo que se produce una mayor absorción de calor en la cámara de combustión y por tanto se reduce la temperatura máxima de la llama.
- Efecto químico: los compuestos CO_2 y H_2O se disocian durante la combustión, modificando la combustión y la formación de NO_x .
- Aumento del retardo del inicio de la combustión: la presencia de EGR aumenta la cantidad de combustible que se combustiona.
- Retraso de todo el proceso de combustión en general.

Existen diversas técnicas de recirculación de los gases de escape cuyo uso repercutirá en las propiedades del gas en el cilindro, el comportamiento del motor y al proceso de control y gestión de la tasa de EGR [60].

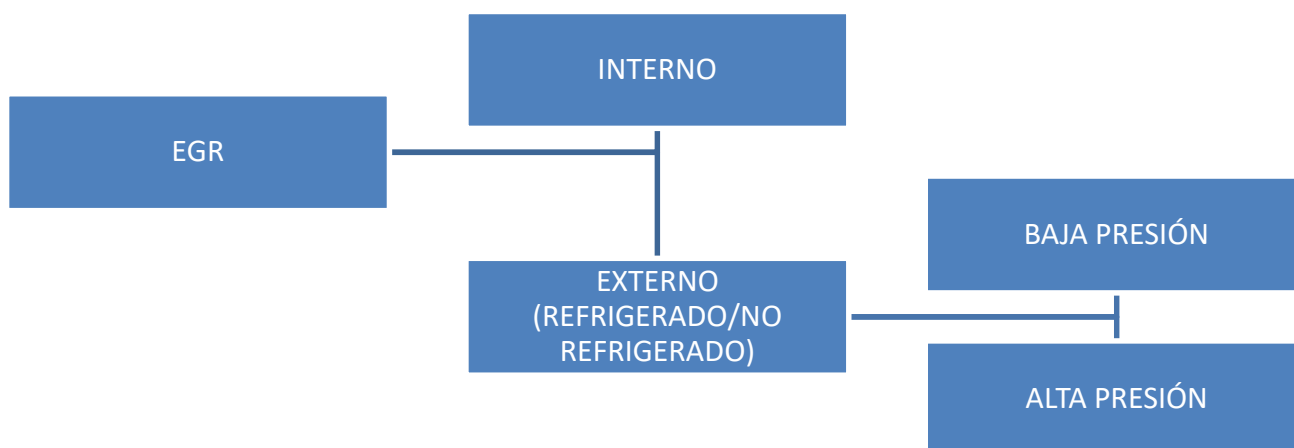


Figura 3-10 Tipos de EGR (Autoría propia)

El EGR interno es aquel en el que los gases quemados permanecen en la cámara de combustión tras el proceso de combustión. Esto se consigue realizando una sincronización de válvulas de escape y admisión. Aunque existen diversos estudios que muestran resultados interesantes en cuanto a la reducción de NO_x con un sistema relativamente simple y económico, los importantes inconvenientes de este tipo de tecnología han hecho que su uso no sea muy común [56]. La principal desventaja de este método es la elevada influencia en la temperatura del gas admitido y la reducida capacidad de controlar la tasa EGR debido a la inflexibilidad de los sistemas de distribución. Sin embargo, los nuevos sistemas de distribución variable pueden solventar este problema y el EGR interno podría resurgir.

El EGR externo el sistema de admisión y el de escape están conectados de manera que el flujo de gas saliente tras un proceso de combustión pueda ser recirculado hacia el cilindro a través de un conducto que es controlado mediante una válvula EGR para obtener la tasa EGR deseada. La tasa de EGR es la proporción entre el gasto másico de gas de escape recirculado respecto del gasto que es trasegado por el motor. Explícitamente:

$$egr = \frac{\dot{m}_{egr}}{\dot{m}_{egr} + \dot{m}_{aire}}$$

Dentro del EGR de tipo externo, se diferencian otros dos tipos dependiendo de dónde se encuentren los puntos entre los que se realiza la conexión entre admisión y escape. En el caso de EGR de alta presión o de ruta corta, se conecta en el sistema de escape antes de la turbina del turbocompresor y en el sistema de admisión se conecta después de la salida del aire del compresor, por lo que todo el conjunto se encuentra a una presión superior a la atmosférica. Es el sistema más usual para motores sobrealimentados. Por otro lado, el EGR de baja presión o de ruta larga, se conecta en un punto de la salida de la turbina y en un punto anterior a la entrada del compresor aprovechando la depresión generada

por el mismo, en ambos puntos el gas se encuentra a menor presión en el motor, de ahí la razón de la denominación utilizada. Para evitar daños en el compresor y en el intercooler el gas de escape se toma después de la salida de un filtro de partículas.

Además, ambas opciones pueden llevar un intercambiador de calor para refrigerar los gases de escape de manera opcional, de forma que se puede diferenciar entre EGR refrigerado y no refrigerado. Gracias a esto, la temperatura del EGR se regula mejor y la temperatura de la masa admitida se puede controlar mejor. En EGR caliente o no refrigerado, los gases recirculados se encuentran a una mayor temperatura que el aire admitido. El incremento de la temperatura de admisión es un efecto en general no deseado de la recirculación de gases de escape puesto que contribuye a aumentar las emisiones de NO_x . Por otro lado, el EGR frío o refrigerado, la temperatura de admisión no se ve tan afectada. Aunque una baja temperatura de admisión sea una ventaja para las prestaciones del motor, la complejidad del circuito se ve incrementada.

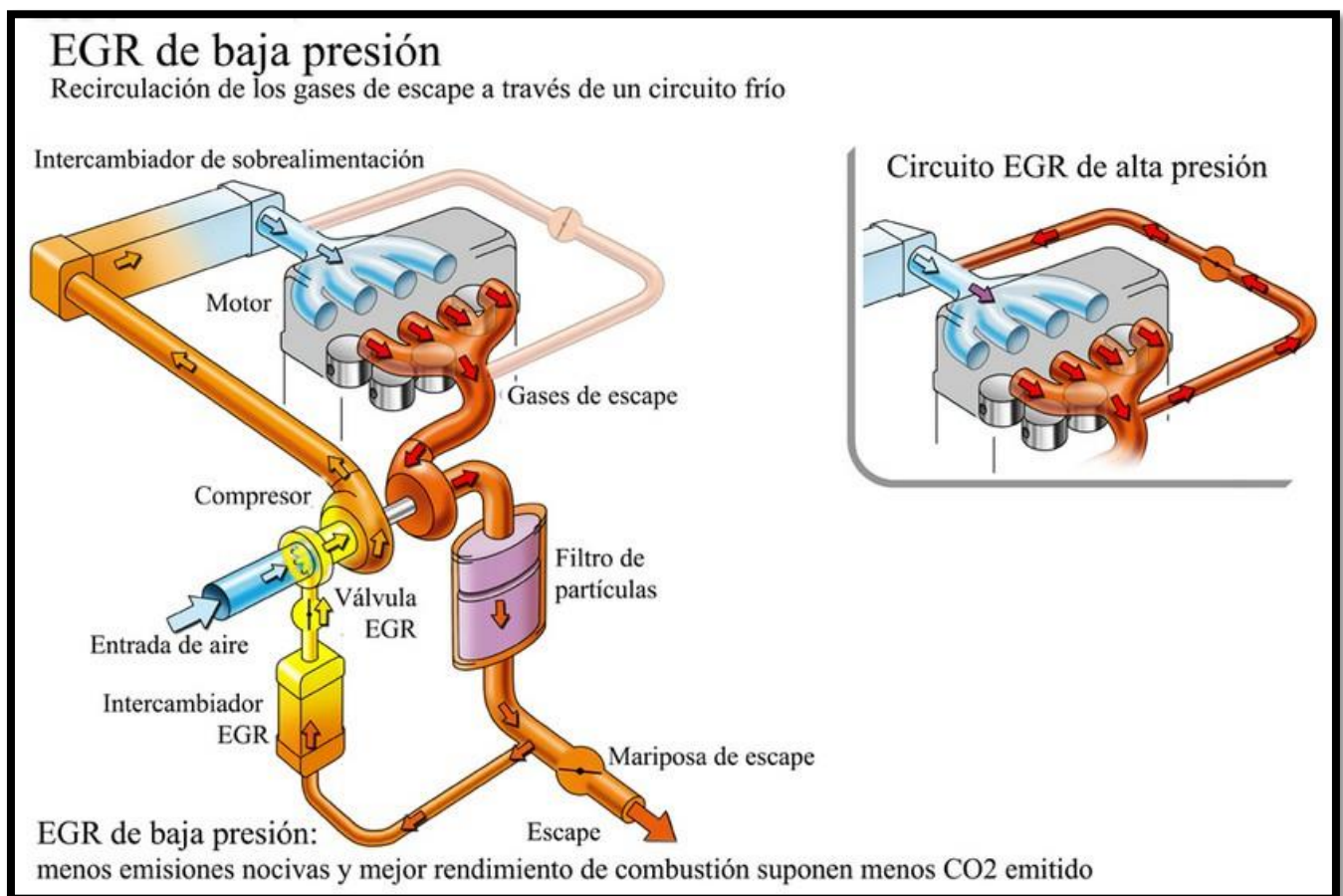


Figura 3-11 Esquema sobre sistema EGR de alta presión y baja presión [61]

Los efectos que produce la EGR en motores diésel sobrealimentados pueden suponer una disminución en el rendimiento del motor como consecuencia ya que el funcionamiento resta potencia al motor [61]. Además, debido a que se produce una mala o incompleta combustión ya que los gases recirculados desplazan parte del aire fresco, se manifiesta un crecimiento de la emisión de partículas debido la disminución de oxígeno en la cámara de combustión y un aumento en el uso de combustible. Por lo tanto, la tasa de EGR debe de establecerse en compromiso con el balance buscado entre la formación de NO_x y partículas [62]. De hecho, las aplicaciones prácticas no suelen usar más del 50% de EGR debido a que las partículas de los gases de escape pueden dañar el motor [63].

3.3.3 Sistema de inyección directa common rail

El sistema de inyección directa common rail permite trabajar con una elevada presión de inyección para conseguir una pulverización fina del combustible por los inyectores dosificando con gran exactitud el caudal de inyección y de generar procesos de inyección previa y postinyección. Con estas características y capacidades se consigue un menor consumo de combustible, una menor cantidad de sustancias nocivas en los gases de escape y un funcionamiento más silencioso del motor. Todas estas características resultan ventajosas para los sistemas de propulsión de buques. En la gráfica de la Figura 3-12 se refleja el porcentaje de emisiones que se pueden eliminar utilizando este sistema de inyección en función del porcentaje de carga del motor [64]. La línea verde, representa las emisiones de óxidos de nitrógeno usando la inyección common rail mientras que la negra representa otro tipo de inyección distinto.

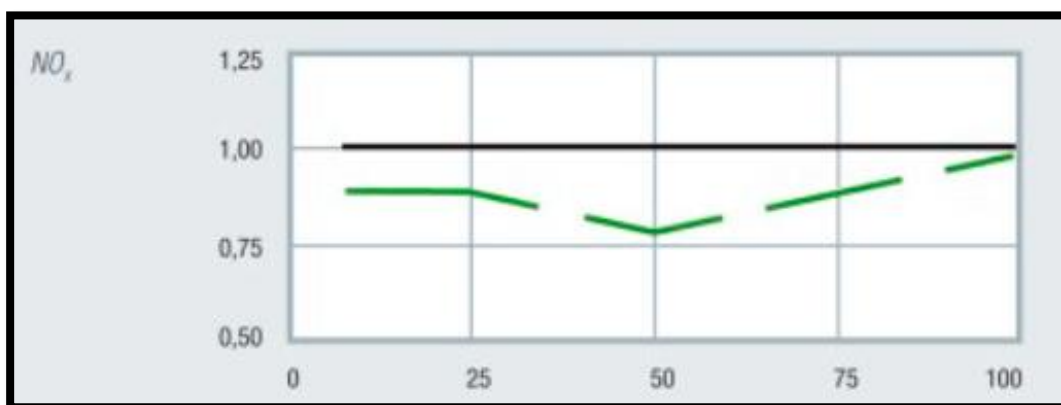


Figura 3-12 Reducción de emisiones de NO_x con el sistema de common rail [64]

Esto se consigue gracias a las amplias posibilidades de variación en la configuración de la presión de inyección y los momentos de inyección ya que el sistema separa la generación de presión (bomba de alta presión) y la inyección (inyectores) utilizando como acumulador de presión el conducto común. Se

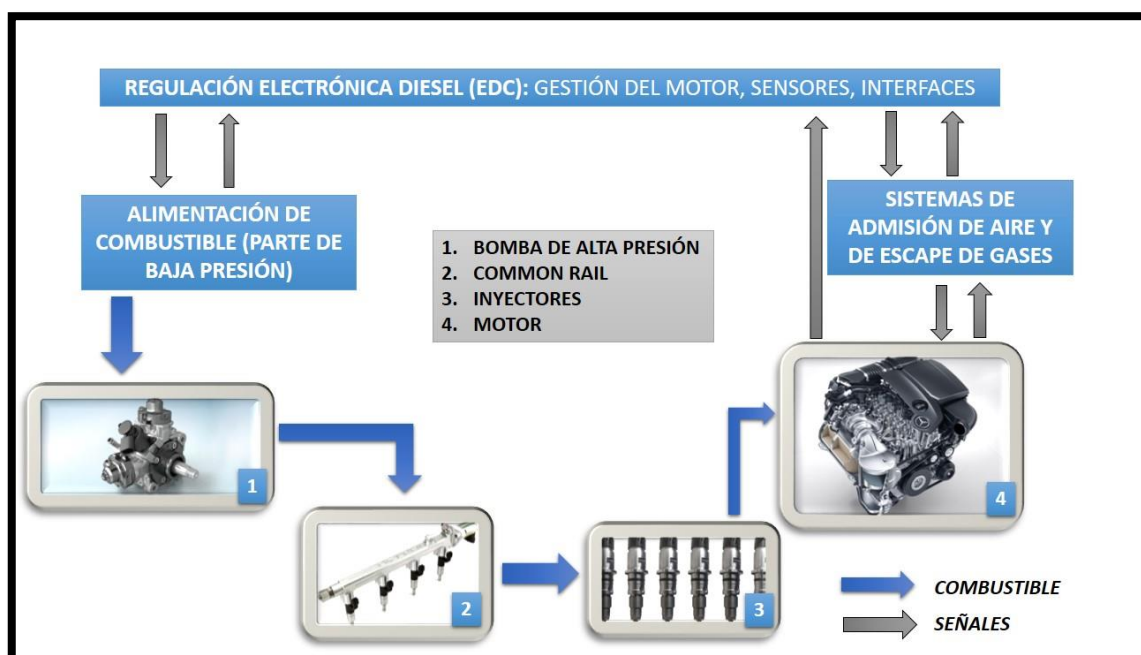


Figura 3-13 Esquema de un sistema de inyección common rail de un turismo [65]

pueden llegar a obtener presiones de hasta aproximadamente 1600 bares, adaptando ésta al estado de servicio, realizar un comienzo variable de la inyección y la posibilidad de efectuar varias inyecciones previas y posteriores.

El ajuste de presión se efectúa mediante una válvula reguladora de presión o una unidad de dosificación. Gracias a las inyecciones previas o múltiples es posible obtener una disminución adicional de las emisiones de gases de escape, y una reducción significativa de los ruidos producidos por la combustión. Este sistema posee puede ser aplicado en diversos campos como en turismos, con motores desde 0,8 litros de cilindrada hasta motores superiores de 8 cilindros con 4 litros de cilindrada, vehículos industriales ligeros con potencias de hasta 30 kW por cilindro y vehículos industriales pesados como navíos de hasta aproximadamente 200 kW por cilindro.

En líneas generales, el sistema common rail puede ser estructurado en 3 partes:

- Parte de baja presión, con los componentes de alimentación de combustible.
- Parte de alta presión, con la boba de alta presión, el conducto común, los inyectores y las tuberías de combustible a alta presión.
- Sistema de regulación electrónica diésel (EDC), con los sensores, unidad de control y elementos de regulación (actores) del sistema.

Los inyectores van equipados con una válvula de conmutación rápida (válvula electromagnética o regulador piezoeléctrico) para controlar la apertura o el cierre del inyector por lo que el control del proceso de inyección para cada cilindro por separado es posible. Todos los inyectores están conectados al conducto común (common rail). La duración de la apertura del inyector y la presión del sistema determinan el volumen de combustible aportado.

La presión de inyección se genera mediante una bomba de alta presión accionada por el motor en el conducto común. La presión es independiente del número de revoluciones del motor y el caudal de inyección. Para la regulación de la presión, existen diversos procesos:

- Regulación en el lado de alta presión: con esta regulación se consigue una rápida adaptación de la presión existente en el conducto común en caso de modificación del momento de servicio como cuando se efectúa un cambio de carga.
- Regulación de caudal del lado de aspiración: gracias a esta regulación el volumen de combustible a alta presión es menor y con ello también el consumo de potencia de la bomba por lo que el consumo de combustible se ve favorecido.
- Sistema de doble regulación: esta configuración permite combinar las ventajas de la regulación en el lado de alta presión y la regulación de caudal en el lado de aspiración [65].

3.3.4 Ciclo de Miller

Es un ciclo termodinámico aplicado en motores de combustión interna de cuatro tiempos. Uno de los objetivos que se persigue cuando se implementan estos ciclos tanto en motores MEP como MEC es la reducción de óxidos de nitrógeno. Consiste en una modificación del ciclo diésel original. En este ciclo, la entrada de aire se interrumpe antes de que el pistón alcance el punto muerto inferior cuando se va a realizar la carrera de compresión, por lo tanto, la temperatura de la cámara de combustión disminuye al expandir el aire que se encuentra dentro de ésta por lo que recíprocamente se disminuye la formación de óxidos de nitrógeno [66]. El sistema se usa en combinación con un turbocompresor de alta presión y un enfriador del aire de admisión [32].

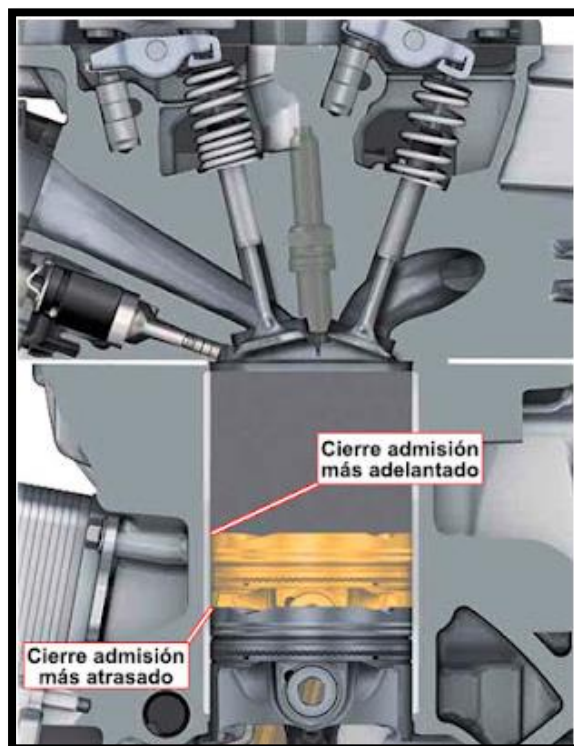


Figura 3-14 Cierre adelantado de la válvula de un motor ciclo Miller [66]

Una de las principales ventajas que posee este ciclo, además de reducir aproximadamente en un 20 % las emisiones de óxidos de nitrógeno, el consumo de combustible no se ve alterado, ni disminuye ni aumenta. La empresa Wärtsilä implantó en uno de sus modelos de motores este sistema, el motor de media velocidad Sulzer ZA40S [67].



Figura 3-15 Motor Sulzer 16ZA40S con ciclo Miller [67]

Los motores con ciclo Miller poseen una serie de ventajas respecto a los motores diésel:

- La relación de compresión, para motores con características semejantes, es mayor en los motores con ciclo Miller, esto hace que sean más eficientes porque existe mayor expansión de los gases de combustión y en consecuencia un mayor aprovechamiento de la energía.

- Al aumentar la relación de compresión, el gas pasa más tiempo dentro de la cámara de combustión por lo que se aprovecha mejor de esa manera la energía producida en la combustión.
- El ciclo Miller posee una mayor eficiencia térmica respecto al motor diésel, en torno al 2% [68].

3.4 Postratamiento de gases de escape

3.4.1 Reducción catalítica selectiva (SCR)

Los catalizadores SCR es un sistema cuyo objetivo es la reducción catalítica de las emisiones de óxidos de nitrógeno que se encuentran en los gases de escape de los motores diésel en un entorno rico en oxígeno inyectando un agente reductor. Emplea un aditivo compuesto por urea en su mayor parte o incluso amoníaco (32,5%, el resto es agua destilada). La urea, comúnmente conocida como AdBlue, es ampliamente utilizada en automóviles que usen esta tecnología [69]. El aditivo se utiliza para buscar una reacción química que actúe sobre los gases de escape antes de que estos lleguen al catalizador, neutralizando así los óxidos de nitrógeno hasta un 90%. Los óxidos de nitrógeno que contienen los gases de escape que resultan altamente contaminantes para los seres humanos y el medio ambiente se convierten en N_2 , que es un gas no nocivo. El propio catalizador no se consume, pero puede estar recubierto por otras impurezas y por lo tanto pierde eficiencia. Esto dependerá en parte del combustible utilizado por el motor [35].

El transporte y almacenamiento de amoníaco resulta peligroso, por lo que en el sector automovilístico que también está siendo afectado por las normativas de emisiones contaminantes de los motores, opte por la dilución de urea en agua [70]. Si una cantidad excesiva de agente reductor, urea o amoníaco, se inyecta en el gas de escape, el amoníaco se emite a la atmósfera. Además de ser un contaminante, el amoníaco puede causar corrosión en el sistema de gases de escape. Por otro lado, se ha demostrado que en estos procesos parte del NO_x reducido se transforma en N_2O . Con la inyección de amoníaco, entre el 3 y 5% es transformado y si se usa urea como agente reductor, se transforma entre el 10 y el 15% [32].

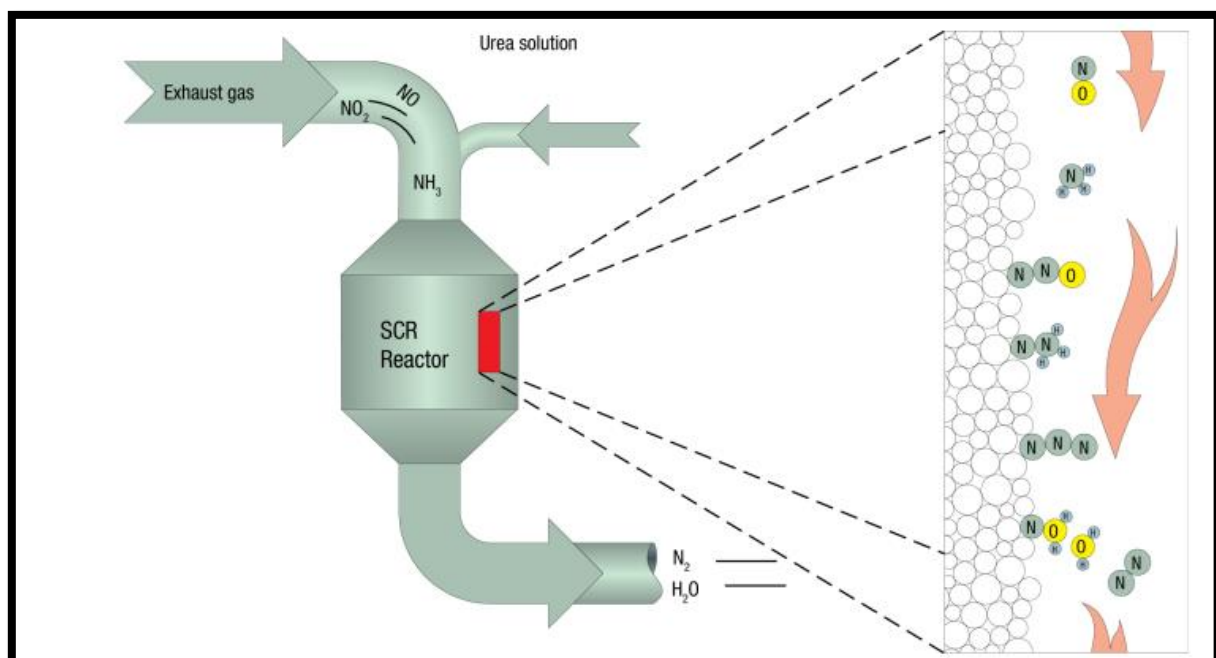


Figura 3-16 Principio de funcionamiento del sistema SCR [71]

Dentro del reactor, tal como se ve en la Figura 3-16 Principio de funcionamiento del sistema SCR, ocurren las siguientes reacciones catalíticas fundamentales en el proceso SCR se muestran a continuación [71]:

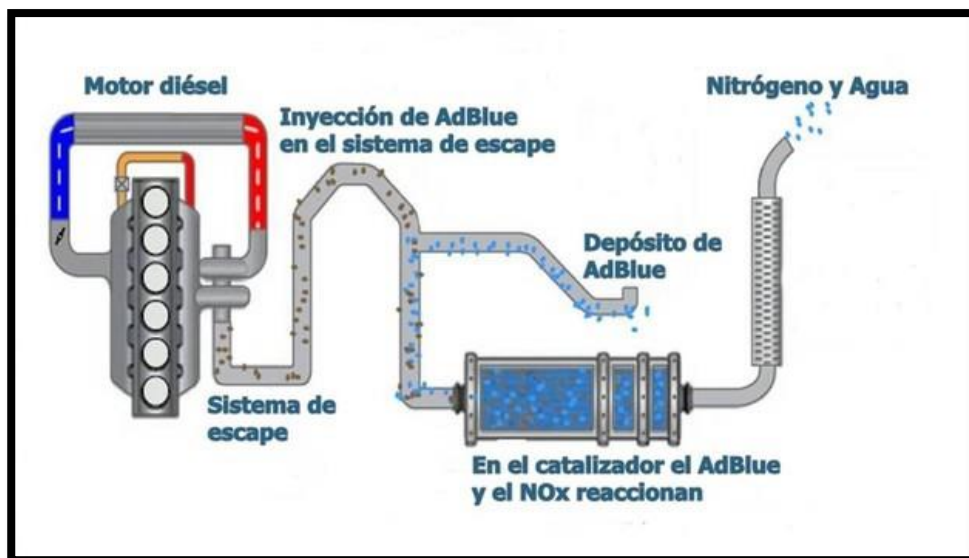
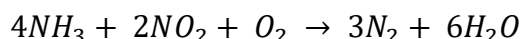
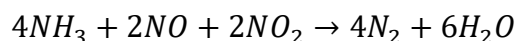
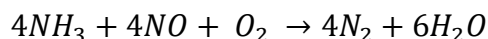


Figura 3-17 Esquema de un sistema de reducción catalítica con AdBlue [73]

A continuación, se describen los elementos que conforman un sistema SCR y en que consiste su funcionamiento:

- Sistema de inyección: suministra el reductor a la corriente de gases de combustión de manera que el flujo proporcionado se aporte en la proporción correcta para conseguir la máxima reducción de NO_x. Se necesita un módulo de administración de agente reductor y una bomba inyectora que introduce el flujo de gases. El módulo de administración integra varios sensores (temperatura, concentración, nivel...) con el fin de controlar el estado del agente reductor que se está aportando, además de un filtro que elimina cualquier partícula del flujo. La bomba inyectora aporta el agente reductor a alta presión, con un grado de pulverización determinado para cada régimen de flujo.
- Agente reductor: existen diversos tipos tales como el amoníaco anhidro, el hidróxido de amonio o la urea. El más conocido, es el AdBlue, denominación comercial del producto AUS32, una disolución de urea al 32,5% en agua desmineralizada regulada por la norma ISO 22241. La disolución entra en contacto con los gases calientes liberando amoníaco, sustancia que ayuga a que se produzca la reacción en el catalizador, transformando los óxidos de nitrógeno en nitrógeno libre y agua [72]. Además, hay que tener en cuenta debido a su alto pH, de 9'5, es peligroso ya que puede actuar como agente corrosivo [73].



Figura 3-18 Imagen del depósito de AdBlue de un automóvil con motor diésel [69]

- Agente catalizador: es el elemento que hace posible la reacción, acelerando el proceso químico para que ocurra a las velocidades que el flujo de gases de combustión requiere. Su elección viene determinada según criterios de conversión de NO_x requerida. Existen varios tipos de agentes catalizadores, en cuanto a materiales (metal, cerámica) y a disposición (laminar, panel). Básicamente, se distinguen entre 3 tipos de catalizadores utilizados en sistemas SCR:
 - Metales nobles: operan entre temperaturas de 175 a 290°C.
 - Metales de transición: operan entre temperaturas de 260 a 450°C.
 - Zeolitas (mineral): operan a altas temperaturas.
- Los metales nobles, platino (Pt) o paladio (Pd), como catalizadores, tienen un poder reductor mayor sobre los óxidos de nitrógeno, pero son menos selectivos que los metales de transición, por lo que tienen tendencia a reaccionar con el dióxido de sulfuro. Hoy en día los materiales más usados en sistemas SCR son los basados en óxidos metálicos, generalmente de cobre (Cu), cromo (Cr) o hierro (Fe), soportados sobre bases de alúmina, silica o dióxido de titanio. La composición del catalizador y sus propiedades físicas determinan el rango de funcionamiento del sistema, y por consiguiente la cantidad de agente requerido y el coste de la instalación.
- Soplador: las emisiones de gas de combustión con altos niveles de materia particulada pueden requerir la instalación de un soplador de hollín. Son instalados en el reactor del SCR para reducir el depósito de materia en el catalizador y su consiguiente reducción de rendimiento. Incluso es posible instalar otros elementos tales como catalizadores de oxidación y filtros de partículas.
- Pretratamiento de los gases de combustión: dependiendo de la temperatura de los gases de escape, es posible que se requiera de un calentador que eleve la temperatura de los mismos a los rangos de funcionamiento del elemento catalizador, por ejemplo, si el sistema SCR se coloca después de un depurador. Por otro lado, se puede reducir el contenido de azufre y la materia particulada antes del SCR, ya que los sulfuros no permiten el buen funcionamiento del agente catalizador. Esto se consigue con torres de lavado para los sulfuros y filtros para partículas [74].

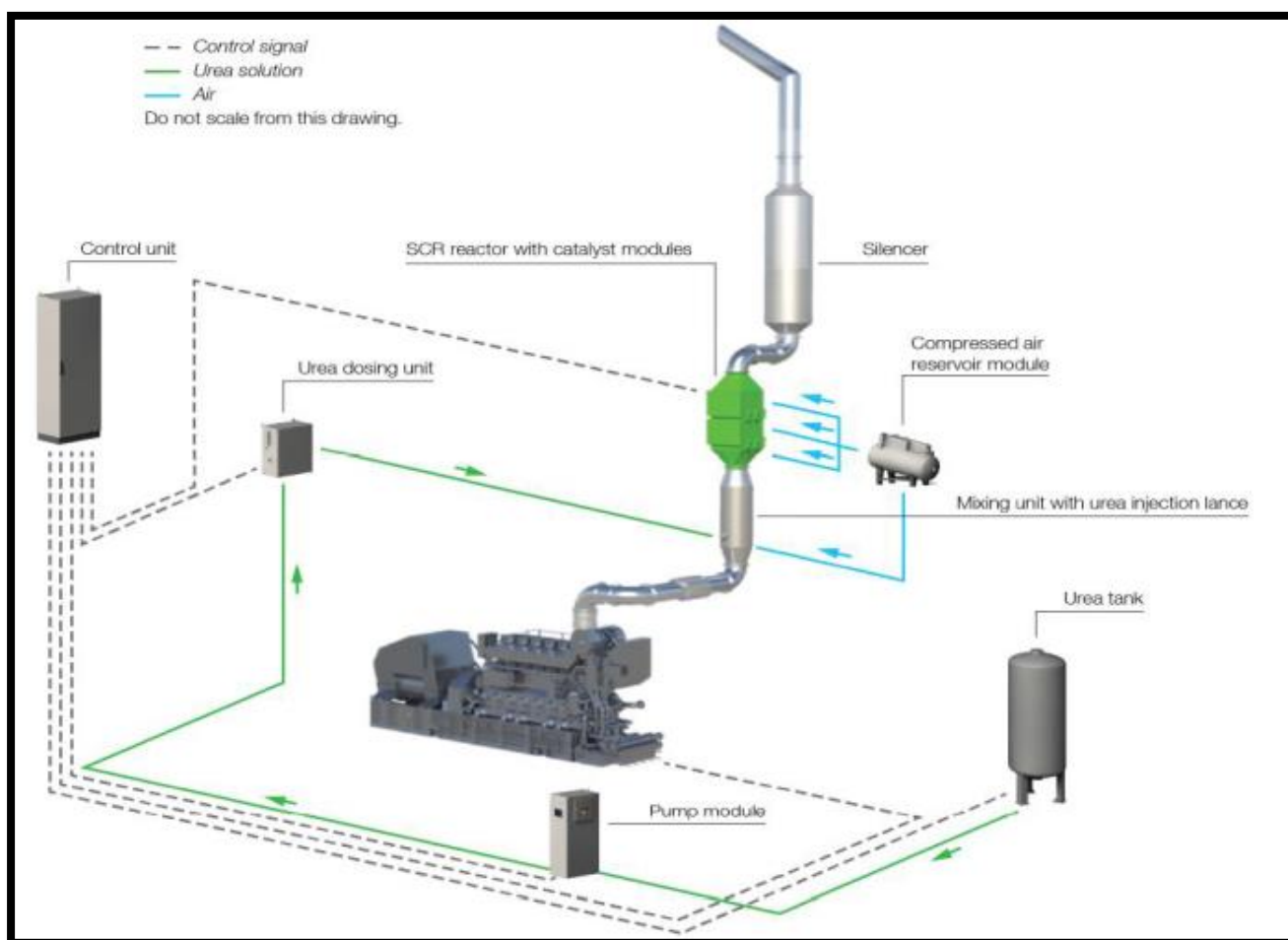


Figura 3-19 Esquema de un sistema SCR implantado en un buque [75]

En la Figura 3-19 se esquematiza la instalación de un sistema de reducción catalítica selectiva que utiliza como agente reductor la disolución de urea [75]. En la instalación se pueden diferenciar los siguientes componentes:

- Reactor SCR: donde se lleva a cabo el proceso catalítico. Contiene elementos reductores con un gran número de canales proporcionando una gran superficie de reacción. En la siguiente imagen se pueden ver los canales del catalizador para asegurar el contacto óptimo entre los gases de escape, el agente reductor y el material del catalizador. El volumen del reactor tiene que contener la cantidad necesaria de material catalizador para lograr la reducción deseada y debe encontrarse en buen estado de limpieza para asegurar su correcto funcionamiento. El perfil de flujo másico debe ser uniforme para que el contacto entre gases de escape y catalizador sea óptimo y también resulta relevante asegurar su resistencia mecánica y estanqueidad [76].

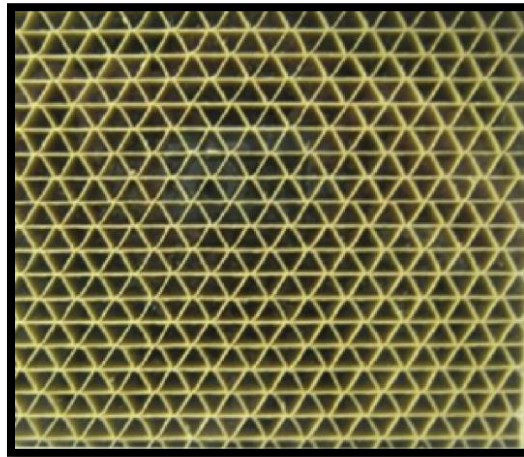


Figura 3-20 Canales del elemento catalítico del SCR [71]

- Módulos del catalizador: donde se encuentran los catalizadores.
- Sistema de soplado del Hollín: el motivo de su instalación es para evitar la contaminación de los elementos del reactor expulsando el hollín con los gases de escape después de ser desprendido de los elementos dentro del reactor.
- Unidad de dosificación: suministra el agente reductor en base a la señal de demanda de dosificación proporcionada por el sistema de control del motor. Es un elemento importante porque una incorrecta dosificación de agente reductor puede conllevar a la creación de bisulfato de amonio que resulta dañino para el sistema.
- Unidad de mezcla: donde se mezclan los gases de escape con el agente reductor antes de ser conducidos al reactor.
- Lanzas de inyección de urea: elemento que inyecta el agente reductor.
- Unidad de control del SCR: es el sistema encargado de controlar todos los procesos relacionados con el sistema de reducción de NO_x .
- Módulo de bombeo de urea: en él pueden encontrarse manómetros para indicar la presión con la que el agente reductor es inyectado.
- Depósito de aire comprimido: el agente reductor es mezclado con aire comprimido antes de pasar a las lanzas de inyección para mejorar la atomización [77].
- Tanque de urea: almacenamiento del agente reductor.
- Silenciador: su objetivo es la atenuación de sonido adicional creado por el sistema SCR.

3.4.2 Catalizadores de tres vías

En el sector automovilístico son los sistemas más efectivos para la reducción de los óxidos de nitrógeno de los gases de escape ya que posee una capacidad bastante alta que ronda aproximadamente el 99% de las emisiones. Este sistema precisa de ausencia de oxígeno y para obtener un buen funcionamiento de esta tecnología se debe producir una mezcla prácticamente estequiométrica, en la que la mezcla de aire y combustible es casi ideal, con muy poco exceso de oxígeno [78]. Por lo tanto, la aplicación en los motores diésel no se ha obtenido de forma eficaz debido a la razón expuesta anteriormente, la relación aire/combustible. Sin embargo, en los motores gasolina son empleados satisfactoriamente [79].

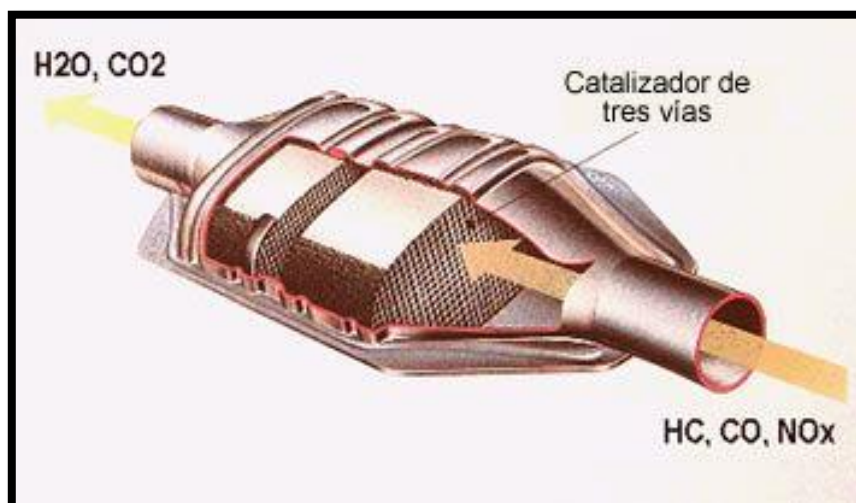


Figura 3-21 Catalizador de tres vías [79]

3.4.3 Almacenamiento y reducción de NO_x (NSR)

Estos sistemas de almacenamiento y reducción de óxidos de nitrógeno constan de dos etapas fundamentales: la primera en la que se almacenan en condiciones de exceso de oxígeno los NO_x, por adsorción sobre sitios activos, denominada “lean phase” (fase pobre en combustible); y una segunda fase denominada “rich phase” (fase rica en combustible) en la cual se liberan y reducen catalíticamente en condiciones reductoras [80].

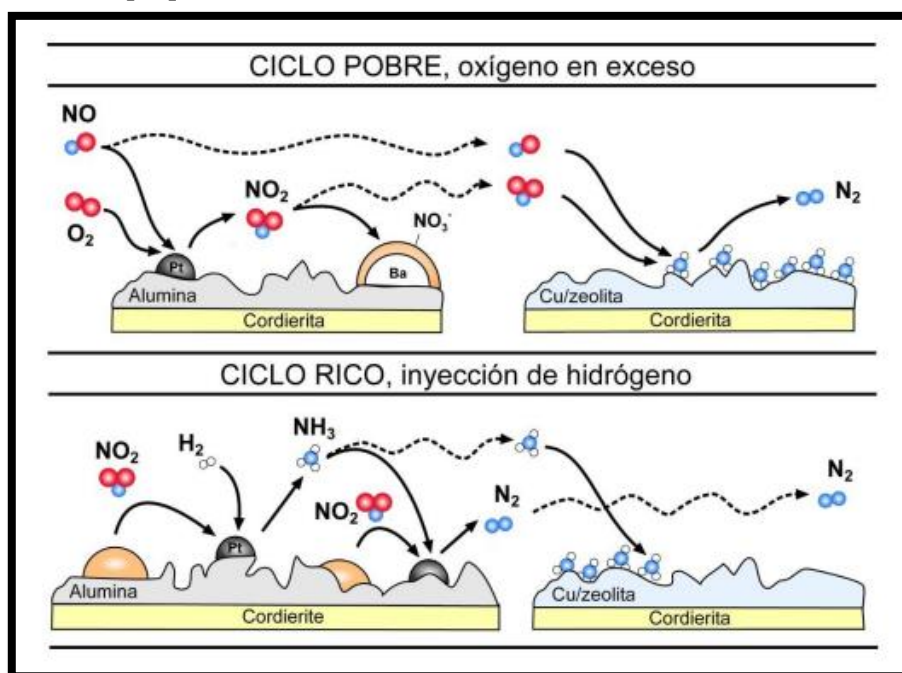


Figura 3-22 Esquema de las reacciones que ocurren en un sistema combinado NSR-SCR [81]

Los catalizadores empleados en los sistemas NSR (NO_x Storage and Reduction) están compuestos habitualmente por un metal noble (como el platino, con alta capacidad de NO a NO₂ y/o el rodio, con mayor actividad en la reducción de NO_x) en pequeñas cantidades. El segundo componente es un óxido metálico alcalino o alcalino-térreo, ya que en ellos se adsorben los óxidos de nitrógeno cambiándolos a otros compuestos tales como nitritos o nitratos. El sistema NSR resulta más eficiente cuando trabaja conjuntamente, NSR-SCR, ya que se reduce considerablemente la producción de amoníaco [81].

El proceso se puede resumir de la siguiente manera:

- Oxidación de NO a NO₂.
- Adsorción de NO_x como nitritos/nitratos en los sitios activos.
- Inyección del agente reductor.
- Liberación de los NO_x almacenados en la superficie del catalizador a la fase gas.
- Reducción de los NO_x a N₂ [79].

Este sistema cuando trabaja en su configuración óptima se consigue una reducción de un 74% de óxidos de nitrógeno [82]. Además, existen estudios que los sistemas que combinan NSR-SCR que pueden llegar a reducir un 98% de óxidos de nitrógeno. Primero, el sistema NSR elimina en un 74% los óxidos de nitrógeno creando un 64% en nitrógeno. Como consecuencia, se crea un 9,5% de amoníaco. Posteriormente, este amoníaco reacciona en el reactor SCR con el resto de NO que abandona el catalizador de NSR, por lo que en el sistema SCR se vuelven a bajar las emisiones de NO_x. Finalmente, se eliminan un 98% de óxidos de nitrógeno de los que el 97% son N₂.

3.4.4 Scrubbers (Técnica de limpieza de gases de escape)

Los scrubbers o los depuradores de gases son unos dispositivos instalados en el sistema de escape del motor que realiza un método basado en la absorción de gases. Los gases de escape son tratados con una variedad de sustancias incluyendo agua de mar, agua dulce tratada químicamente o sustancias secas, con el fin de eliminar la mayor parte de los SO_x (>90%) de los gases de escape y reducir la PM (60-90%) y NO_x (<10%) en cierta medida [57]. Este sistema es mayoritariamente usado cuanto mayor es el consumo de combustible de un buque para cumplir con los límites de contenido de azufre de los combustibles marinos [83].

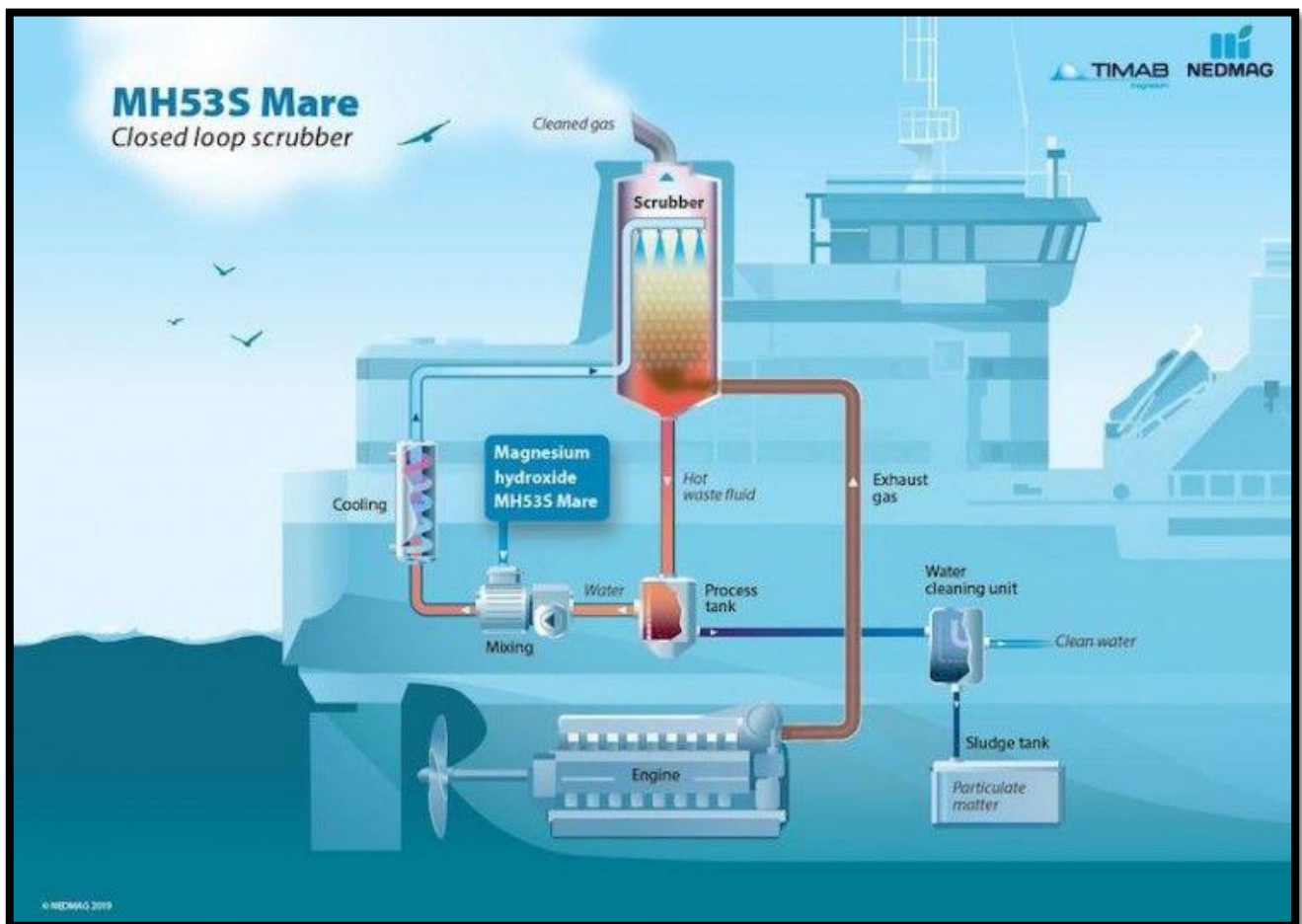


Figura 3-23 Esquema de un scrubber [83]

Para la depuración de los compuestos eliminados de los gases de escape se crea un flujo de residuos que contiene la sustancia utilizada para el proceso de limpieza más los SO_x y PM eliminados. Al ser los SO_x solubles en agua, los gases forman ácidos fuertes que reaccionan con la alcalinidad natural del agua de mar, o la alcalinidad derivada de las sustancias añadidas, formando la sal sulfato de sodio soluble, que es una sal natural en los mares.

Por otra parte, la PM en el escape queda atrapada en el agua de lavado añadiéndose a los lodos generados. El flujo de residuos y lodos generados tienen que ser procesados de acuerdo con las directrices de la OMI antes de la descarga al mar, cuando así lo permita, o se almacena y se descarga a tierra como una sustancia de desecho.

Después del proceso de limpieza, los gases ya tratados se emiten a la atmósfera.

Actualmente, existen diseños diferentes de sistemas de depuración de gases para tratar las emisiones de óxido de azufre que provienen de los motores diésel. Hay dos conceptos básicos comúnmente propuestos para la aplicación de los sistemas de limpieza gases, el tipo de lavado en seco y el tipo lavado húmedo que a la vez se divide en tres sistemas, sistema circuito abierto, sistema circuito cerrado y sistema híbrido.

Los depuradores de gases en seco utilizan cal hidratada granulada que permite eliminar los compuestos de SO_x mediante una reacción química. La cal hidratada reacciona con los gases de escape y absorbe los compuestos de SO_x. Como resultado del proceso se crean gránulos de yeso que son almacenados en a bordo para su posterior eliminación en tierra.

Dentro de los depuradores de gases húmedos distinguimos dos tipos: en circuito abierto o en circuito cerrado. Cuando es circuito abierto, los gases de escape son tratados directamente con agua de mar debido a su alcalinidad natural para neutralizar los SO_x, que luego se descargan al mar. Gracias a esto, se necesitan menor cantidad de equipos [74]. Sin embargo, navegar en aguas con poca alcalinidad puede afectar al sistema. En el caso de circuito cerrado, se usa agua dulce tratada con un químico alcalino como soda caustica para neutralizar el SO_x y eliminarlo. El agua de lavado se hace recircular y se añade agua dulce adicional en caso de pérdidas de caudal. Además, una pequeña cantidad del agua de lavado se purga a la planta de tratamiento para ser descargada al mar. Su rendimiento no se ve afectado pero necesita de una instalación más compleja [84].

A continuación, se hace un resumen sobre todos los sistemas de reducción estudiados a excepción de los combustibles alternativos.

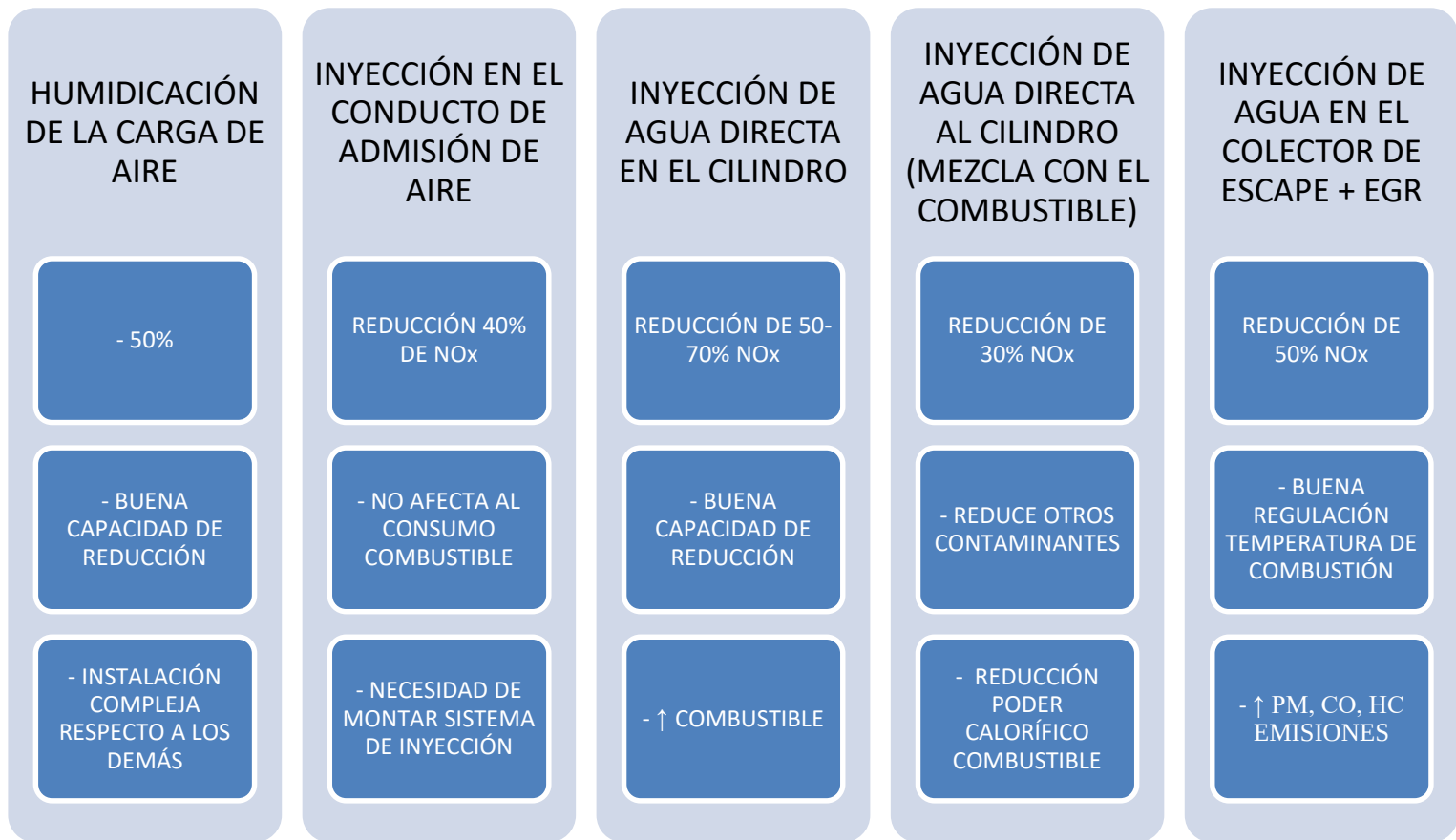


Figura 3-24 Resumen sobre los distintos sistemas (Autoría propia)

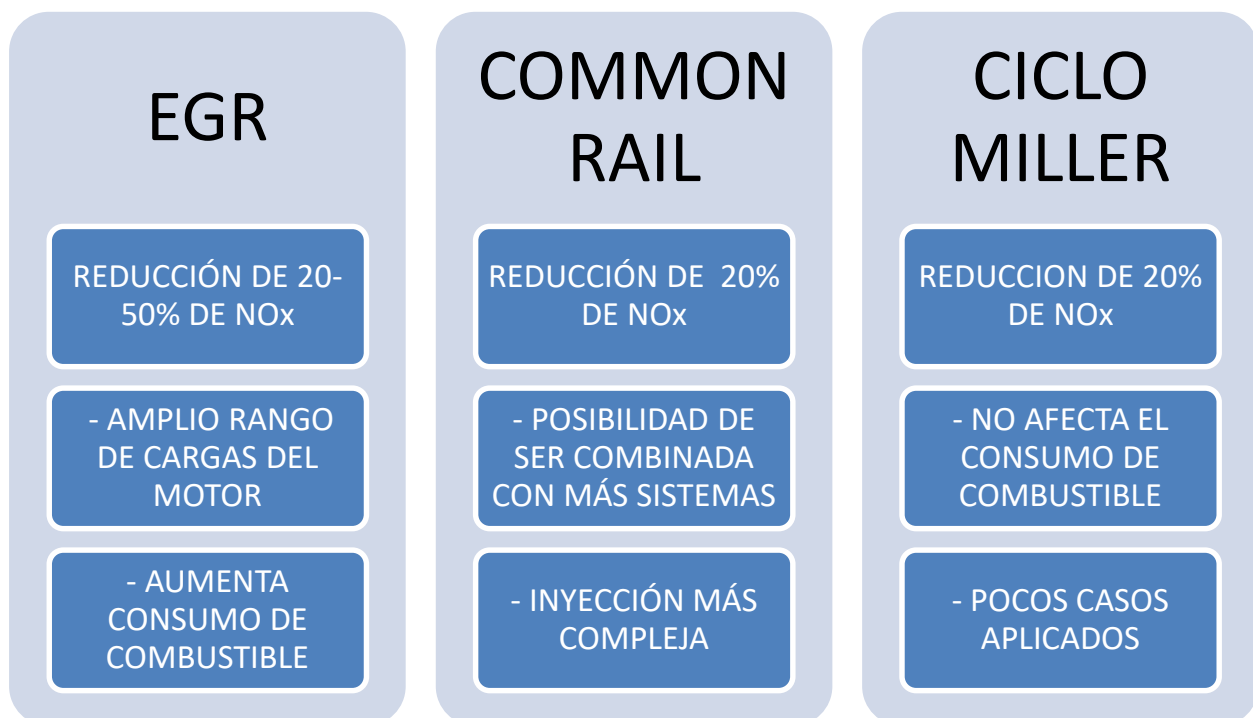


Figura 3-25 Resumen sobre los distintos sistemas (Autoría propia)

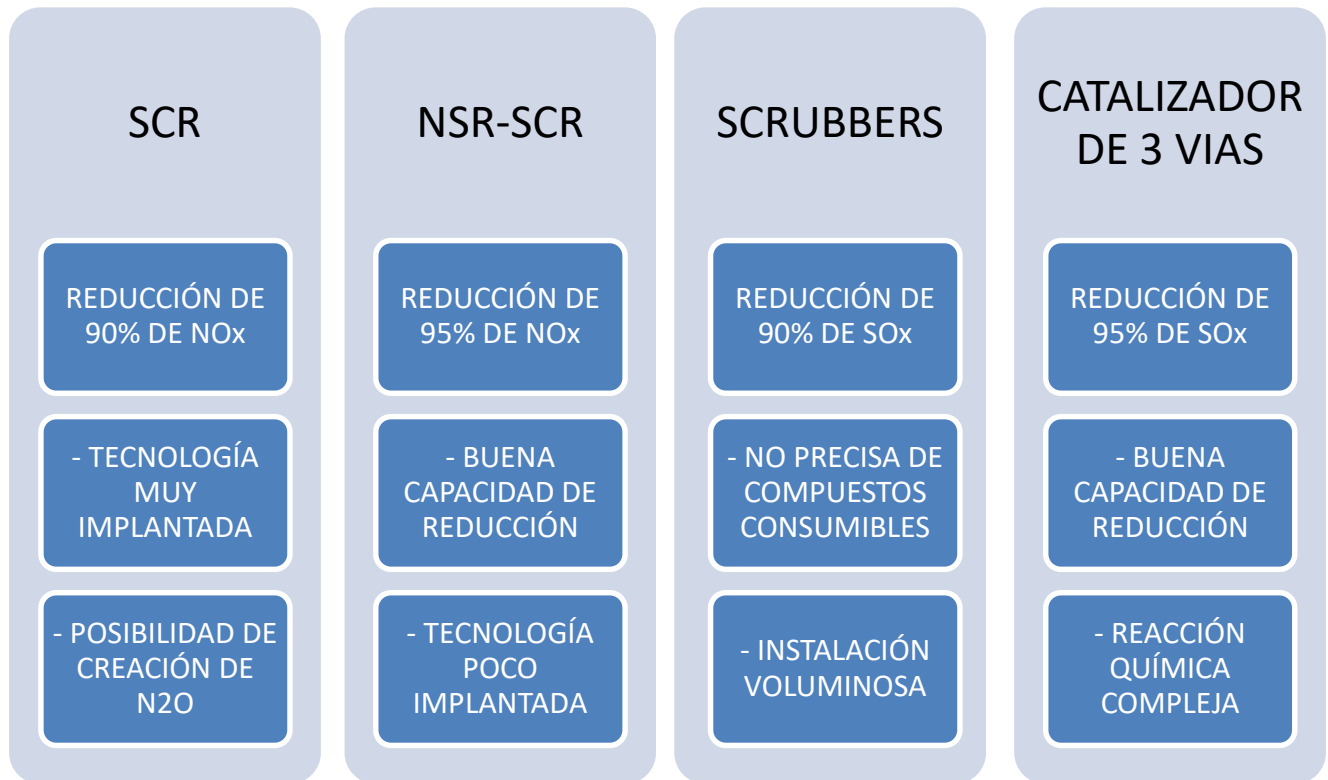


Figura 3-26 Resumen sobre los distintos sistemas (Autoría propia)

4 PROPUESTAS DE CONTROL DE EMISIONES

Para abarcar el estudio de las emisiones que producen los sistemas de propulsión de los buques de la Armada Española se analizan las fuentes de estas emisiones. Primero, para estudiar las emisiones de azufre se debe tener en cuenta que este compuesto proviene fundamentalmente del combustible. Además, la normativa aplica la restricción sólo en el combustible en cuanto a contenido de azufre en el mismo. Por lo tanto, se estudiarán los diferentes combustibles que usan los buques de la Armada Española y su contenido en azufre y proponer medidas para su cumplimiento. Por otro lado, las emisiones de óxidos de nitrógeno no provienen principalmente del combustible en sí, sino del proceso de combustión producido en el motor. De esta manera, se estudiarán las emisiones de nitrógeno que expulsan algunos motores diésel de ciertos buques de la Armada española y sugerir sistemas para controlar las emisiones de nitrógeno en base a lo estudiado anteriormente en 1 y los principales factores que rigen la producción de emisiones de nitrógeno estudiados en el apartado 2.4.

4.1.1 *Emisiones de SO_x*

Como se ha comentado anteriormente, para estudiar las emisiones de SO_x se analizarán los distintos combustibles que adquiere la Armada Española para el uso en los buques. Actualmente, los combustibles en uso son:

- DFM F76.
- Marine Gas Oil DMA.
- Gasóleo B.

4.1.1.1 *Combustible DFM F76*

El combustible que usa la Armada española para la propulsión de sus buques es el F-76 en código OTAN. Es un combustible destilado obtenido a partir de una combinación compleja de hidrocarburos producidos por la destilación del petróleo crudo y no contiene fuel residual. Éste está regulado de acuerdo a la normativa MIL-DTL-16884 P, que establece un límite de contenido de azufre 15 mg/kg.



Figura 4-1 Imagen de buques de la Armada realizando petroleo en la mar (FAS) [101]

Por lo tanto, el buque que utilice este combustible puede navegar por las zonas de control de emisiones para óxidos de azufre cuyo límite es de 100 gramos de azufre por cada kilo de combustible. Sin embargo, existe la posibilidad en determinadas zonas geográficas en las cuales no es posible disponer de combustible con el límite de contenido de azufre requerido por lo que se estudiará y autorizará para cada caso [85].

A continuación, se enumera una lista de proveedores de combustible DFM F76 a los buques de la Armada Española. Además, se muestran los datos sobre los precios del combustible dependiendo en función de la fuente de obtención [86]. Estas fuentes son:

- USN: referido a los suministros de combustible de las bases navales de Estados Unidos tales como Souda, Guam o incluso en la Base Naval de Rota. Establecen anualmente un precio para cada combustible y aplican a los suministros a todas las marinas en todas las bases pertenecientes a EEUU por todo el mundo.
- Marinas extranjeras: referido a los suministros que sirven a los buques españoles en las bases navales o por medio de maniobra de FAS (fueling at sea) en la mar de los países OTAN.
- NSPA: la NSPA (Nato Support and Procurement Agency) suministra el combustible en todos los puertos extranjeros del mundo, que no estén incluidos en los anteriores (USN o marinas extranjeras).
- Repsol: empresa dedicada al suministro de combustible en todos los puertos nacionales.
- Depósito de Arsenales: estos depósitos se rellenan anualmente por medio de un buque tanque. Al ser a granel, suele resultar un precio más económico.

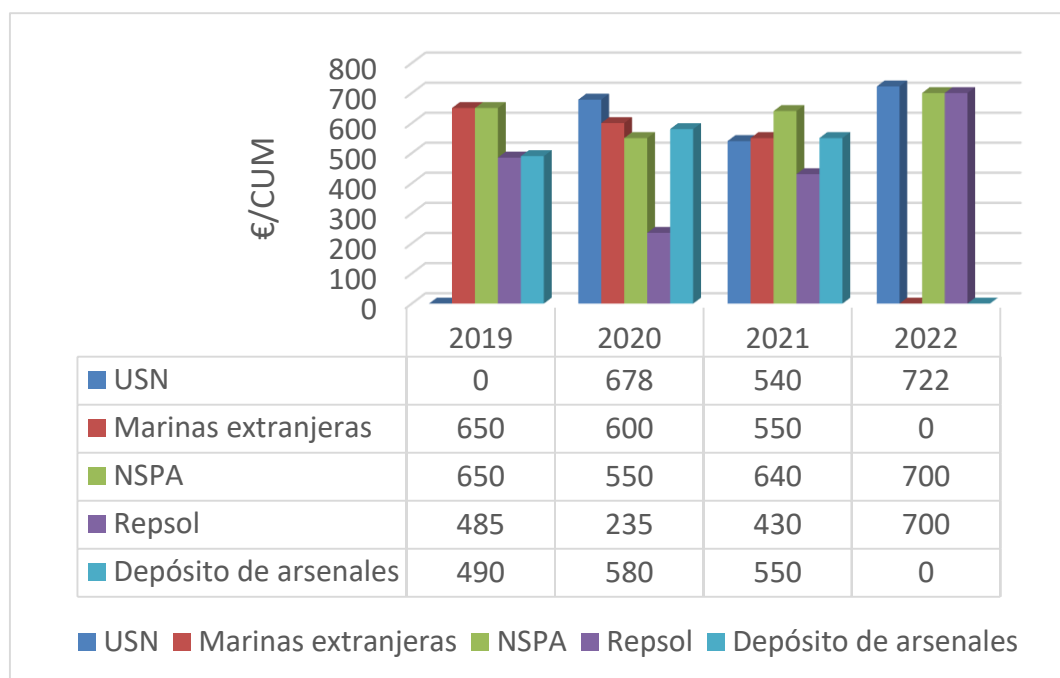


Gráfico 1 Evolución del precio del combustible DFM F76 según la fuente de obtención

La equivalencia de 1 CUM en unidades del SI (Sistema Internacional de Unidades) es de 1000 litros.

4.1.1.2 Otros combustibles

Además del DFM F76, la Armada Española usa otros combustibles para la propulsión de sus buques. Existen otros dos combustibles, el MGO (Marine Gas Oil) y el gasóleo B. El MGO utilizado es el DMA, esta nomenclatura hace referencia a la calidad del combustible. El combustible está regulado por la norma ISO 8217 2017 “Fuel Standard for marine distillate fuels”. Para el DMA se requiere un contenido máximo de azufre de 1,0 % en masa, por lo que aquellos barcos que usen este combustible no podrán utilizarlo debido a que desde el 2020 el Anexo VI establece un límite del 0,5 % en masa para combustibles marinos. Por lo tanto, debería estudiarse cuales serían las medidas a adoptar para reducir las emisiones producidas por el buque [87].

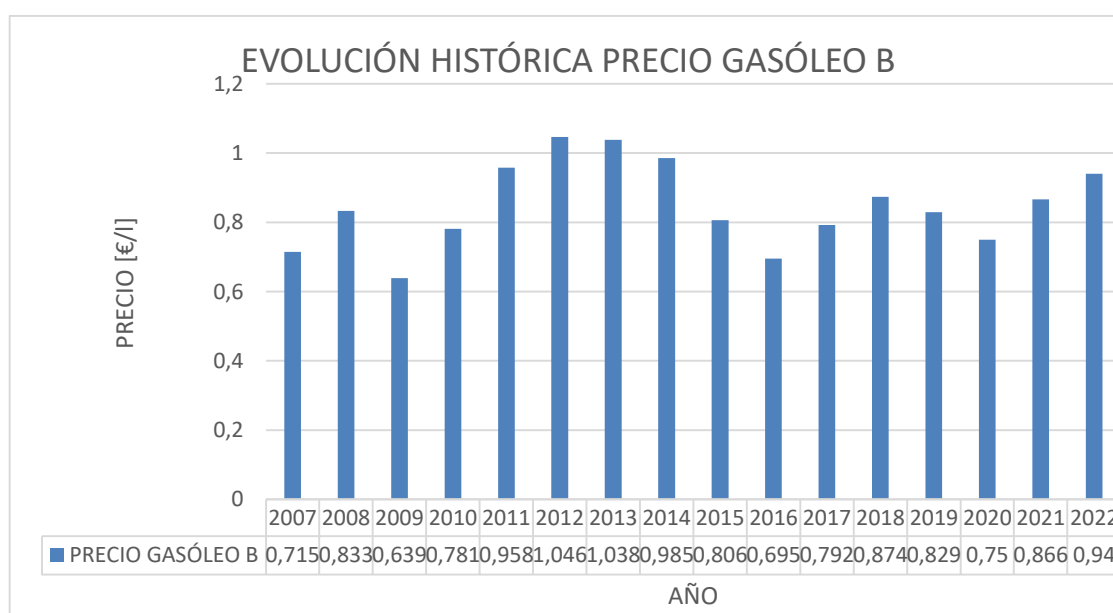


Gráfico 2 Evolución histórica del gasóleo B

Por otra parte, el gasóleo B este es el combustible adquirido por la Armada Española a nivel nacional que está regulado por el Real Decreto 1088/2010 que establece las especificaciones técnicas de gasolinas, gasóleos, utilización de biocarburantes y contenido de azufre de los combustibles de uso marino. La Armada usa el gasóleo B, que está destinado para uso agrícola y marítimo cuyo contenido en azufre es de 1000 mg/kg, es decir, un 0,1 % en masa. De esta manera, se puede afirmar que este combustible cumple con las especificaciones para navegar por las zonas de control de emisiones de azufre.

4.1.1.3 Propuestas

La Armada Española tiene a su disponibilidad combustibles que cumplen con el Anexo VI del Convenio MARPOL que establece unos requisitos para el contenido de azufre en el combustible tal como se menciona en 2.1.2.3, concretamente con los niveles de emisiones de azufre para la navegación de buques en zonas SECA, ya que los productores de hidrocarburos adaptan los combustibles a la normativa de aplicación civil. No obstante, en el 3.2 se mencionan algunas de las posibles alternativas para sustituir o ser otra opción disponible además de los combustibles vigentes.

4.1.2 Emisiones de NO_x

Para el análisis de emisiones el estudio se centrará en los BAM, a los que se le aplica el nivel II y el nivel III de restricciones de emisiones de NO_x.

	MOTOR DE BABOR	LÍMITE TIER II	LÍMITE TIER III
EMISIONES NO _x (g/kWh)	8,21	8,48	2,15

Tabla 4-1 Límites de emisiones de NO_x para los buques BAM [88]

Como se puede ver en la Tabla 4-1, los motores propulsores de los BAM cumplen el nivel II, sin embargo, no cumplen con el nivel III. Por lo tanto, se estudiará cuál sería el sistema más idóneo para que los BAM, el Audaz y el Furor, que estarían bajo las restricciones de nivel III.

Como se ha detallado en el estado del arte, las emisiones de NO_x producidas por los motores de combustión están relacionadas con el propio proceso de combustión. La fuente principal de creación de NO_x está relacionada con la temperatura alcanzada en la cámara de combustión que provoca un aumento en la velocidad de formación de los NO_x. Por lo tanto, para abarcar el estudio se procederá a realizar una investigación a partir de distintas fuentes bibliográficas y posteriormente se sintetizará esa información para tratar las posibilidades existentes. Se procederá a estudiar cuales serían los métodos más adecuados en base a una serie de criterios:

- Viabilidad económica.
- Estado de maduración de la tecnología en sí.
- Dificultad para su implantación en la plataforma.
- Eficacia.

A día de hoy, el nivel II se alcanza con la instalación de motores de última generación que lo cumpla o con sistemas de reducción de emisiones, pero el Nivel III únicamente se ha conseguido alcanzar, actualmente, mediante la instalación de un sistema de reducción catalítica selectiva (SCR). Por lo tanto, se resume en el siguiente esquema para el entendimiento del asunto sobre los niveles y las medidas propuestas para aquellos buques que tengan que cumplirlas.

4.1.2.1 Reducción catalítica selectiva (SCR)

Como anteriormente se ha mencionado, actualmente sólo se puede conseguir con sistemas con una capacidad de reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno tales como la reducción catalítica selectiva (SCR) que ofrecen unos niveles de reducción entorno al 80-95%. Es una tecnología bastante estudiada y eficaz, ya que debido a las normativas anticontaminación que afectan a los automóviles es un sistema que ha sido ampliamente implementado en éstos. Además, la implantación del sistema resulta relativamente sencilla ya que no haría falta modificar los motores solo tendría que incorporarse directamente a la extracción de los gases de escape.

A continuación, se realiza un estudio económico sobre la implantación de este sistema teniendo en cuenta tanto el coste de la instalación en el buque y una estimación del coste relacionado con el agente reductor consumido durante su funcionamiento.

El motor para el que se ha realizado es el Wärtsilä 38, diésel de 4 tiempos. El motor posee 18 cilindros y una potencia de 5800 kW. Posee el sistema de inyección common rail y está sobrealimentado [89].



Figura 4-2 Motor Wärtsilä 38 [89]

Podría asemejarse a los motores que llevan las fragatas F-100 Clase “Álvaro de Bazán”, que incorporan dos motores diésel de cuatro tiempos IZAR BRAVO 12 de 4500 kW de potencia continua (en la primera serie), Bravo 16 en la segunda, no reversibles, de inyección directa, turboalimentados con refrigeración del aire de carga y configuración de los cilindros en V [90] y los buques de acción marítima (BAM) de la Armada española que posee motores que aportan una potencia de 5200 kW con múltiples mejoras tales como sistemas de enfriamiento del pistón e inyección electrónica common rail.

Los componentes principales del sistema son:

- Reactor SCR.
- Unidad de control.
- Unidad de dosificación.
- Sistema de mezclado de gases
- Control y automatización de la unidad.
- Elementos catalizadores.

- Unidad de sistema de Urea (agente reductor).
- Sistema de soplado de hollín.
- Sistema de inyección de urea y mezclado de gases.
- Sistema de dosificación de urea.
- Componentes y requisitos adicionales: sistema monitorizado de NO_x, urea en espera en la bomba, inyector de solución de urea, aire comprimido a 6 bares, bombas de suministro de solución de urea, tuberías y otros equipos.

A continuación, se dispone de un gráfico resolutivo de las emisiones de óxidos de nitrógeno y las restricciones asociadas a su motor.

	MOTOR DE BABOR	LÍMITE TIER II	SISTEMA SCR (80%)	TIER III
EMISIONES NO _x (g/kWh)	8,21	8,48	1,64	2,15

Tabla 4-2 Comparación de emisiones de NO_x del BAM “Furor” [88]

Como se puede ver, el buque cumple tanto los dos niveles, sólo en el caso de que se implantará el sistema SCR podría cumplir con el nivel III.

A continuación, se muestra el presupuesto para la instalación del sistema.

CUADRO DE PRECIOS POR PARTIDAS

CONCEPTO	PRECIO	UNIDADES	COSTE
Sistema de reducción NOR Wärtsilä	196.820 €	2	393.640 €
Tanque de urea líquido	5.904 €	2	11.808 €
Bomba de dosificación de urea	1.245 €	4	4.981 €
Control de dosificación	8.455 €	2	16.911 €
Inyectores de urea	6.056 €	4	24.224 €
Válvulas bypass en escape	563 €	2	1.127 €
Soplador de hollín	4.920 €	4	19.682 €
Mezcladores estáticos	8.932 €	4	35.730 €
TOTAL			508.103 €

Tabla 4-3 Cuadro de precio descompuesto por cada componente del sistema SCR [91]

Al presupuesto destinado a la adquisición de los elementos que conforman el sistema, habría que añadirle el precio de montaje, la puesta en marcha y el importe de ejecución por contrata.

Además, hay que tener en cuenta el consumo del agente reductor, que en este caso, se elige el AdBlue. Como dato, por cada litro de solución líquida de urea se eliminan 0,6815 kg de NO_x para una reducción de óxidos de nitrógeno [91]. Además, sabiendo el flujo másico de óxidos de nitrógeno que desprende los dos motores diésel del BAM “Furor” es 85868 g/h de NO_x.

$$85868 \frac{g NO_x}{h} = 85,868 \frac{kg NO_x}{h}$$

$$\frac{1 hora}{85,868 kg NO_x} \times \frac{0,6815 kg NO_x}{1 l AdBlue} = 0,0078 \frac{hora}{l AdBlue} \rightarrow 126 \frac{l AdBlue}{hora}$$

Por lo tanto, para conseguir una buena autonomía se debe tener en cuenta el consumo de AdBlue para que la autonomía del tanque de almacenaje de AdBlue sea acorde con éste.

Para una autonomía de 30 días, se necesitaría un tanque de 90 m³ aproximadamente. Hay que tener en cuenta que para buques a los que se les desea implantar esta tecnología presentan una dificultad ya que el espacio del tanque de urea no estaba estimado inicialmente en el diseño del buque.

El precio del AdBlue rondó los 0,845 €/L el momento en el que se realiza el estudio, por lo que el gasto por hora de agente reductor será:

$$126 \frac{l AdBlue}{hora} \times \frac{0,845 €}{1 l AdBlue} = 106,47 \frac{€}{hora}$$

4.1.2.2 Inyección directa de agua (DWI)

La inyección de agua (DWI, Direct Water Injection) en motores diésel ha sido estudiada frecuentemente tanto por empresas como por universidades y centros de investigación. De hecho, existen empresas que han empleado estos sistemas en sus motores. Por lo tanto, se elige este método debido a la relativa facilidad para su implantación en motores con relativa antigüedad, ya que el agua podría provenir de los mismos generadores de agua a bordo ya que el agua salada posee una alta capacidad corrosiva.

El siguiente estudio [92] abarcó el comportamiento de un motor diésel mono cilíndrico de cuatro tiempos refrigerado por agua cuando se utiliza un sistema de inyección directa de agua en el cilindro.

El motor posee un sistema de inyección de combustible diésel independiente del de agua. De esta manera, existe flexibilidad para controlar el flujo de agua inyectado. El sistema de inyección de agua está localizado en la cabeza del cilindro que está conectado al motor para realizar la inyección acorde en el momento determinado. Para controlar la inyección de agua se diseñó y fabricó un sistema para variar el momento en el que el agua es inyectada en el cilindro. Además, se instaló un controlador de temperatura para estudiar el efecto de la inyección de agua a altas temperaturas y válvulas que controlan el flujo de diésel y de agua. Por último, también se dispuso de un sistema para el análisis de los gases de escape.

En el estudio la inyección de agua se ha realizado para distintos momentos, antes de la combustión y después de la combustión. Se establece un parámetro para medir la cantidad de agua introducida que se define de la forma siguiente:

$$Diesel - Agua = \frac{Caudal de diésel a plena carga}{Caudal de agua}$$

A plena carga, el caudal de diésel fue de 20 cc/min.

Para la comprensión de este ratio se dan dos ejemplos:

- Para un ratio de 1-1, el caudal para los dos elementos es el mismo.
- Para un ratio de 1-3, el caudal del agua es 3 veces mayor que el caudal de diésel.

Por lo tanto, en este estudio se introduce mayor cantidad de agua que de diésel desde ratios de 1:1 a 1:4. Los parámetros del motor comprobados para el estudio del rendimiento son los descritos a continuación:

- Potencia de frenado (BP, “brake power”): es un parámetro que mide la potencia o cantidad de energía una vez que otras partes como la caja de cambios, alternador y bomba de agua han sido

alimentados. Es una manera efectiva de medir la potencia de un motor ya que se está valorando la capacidad de éste para producir trabajo en el eje de salida.

- Consumo de combustible específico (BFSC, “brake specific fuel consumption”): es el gasto de combustible diésel.
- Eficiencia térmica (“brake thermal efficiency”): es la diferencia existente entre la potencia del combustible y la potencia indicada del propio motor. Es decir, el motor consume una cantidad de combustible que posee un poder calorífico conocido y en su interior, junto con el aire, produce una potencia indicada, restándole las pérdidas por rozamientos entre otras. La eficiencia térmica puede definirse como:

$$\text{Eficiencia térmica} = \frac{\text{Potencia indicada}}{\text{Potencia combustible}}$$

- Emisiones en los gases de escape de NO_x, HC and CO: en este caso, sólo se evaluarán las emisiones de NO_x ya que las restricciones están impuestas en las emisiones de este compuesto.

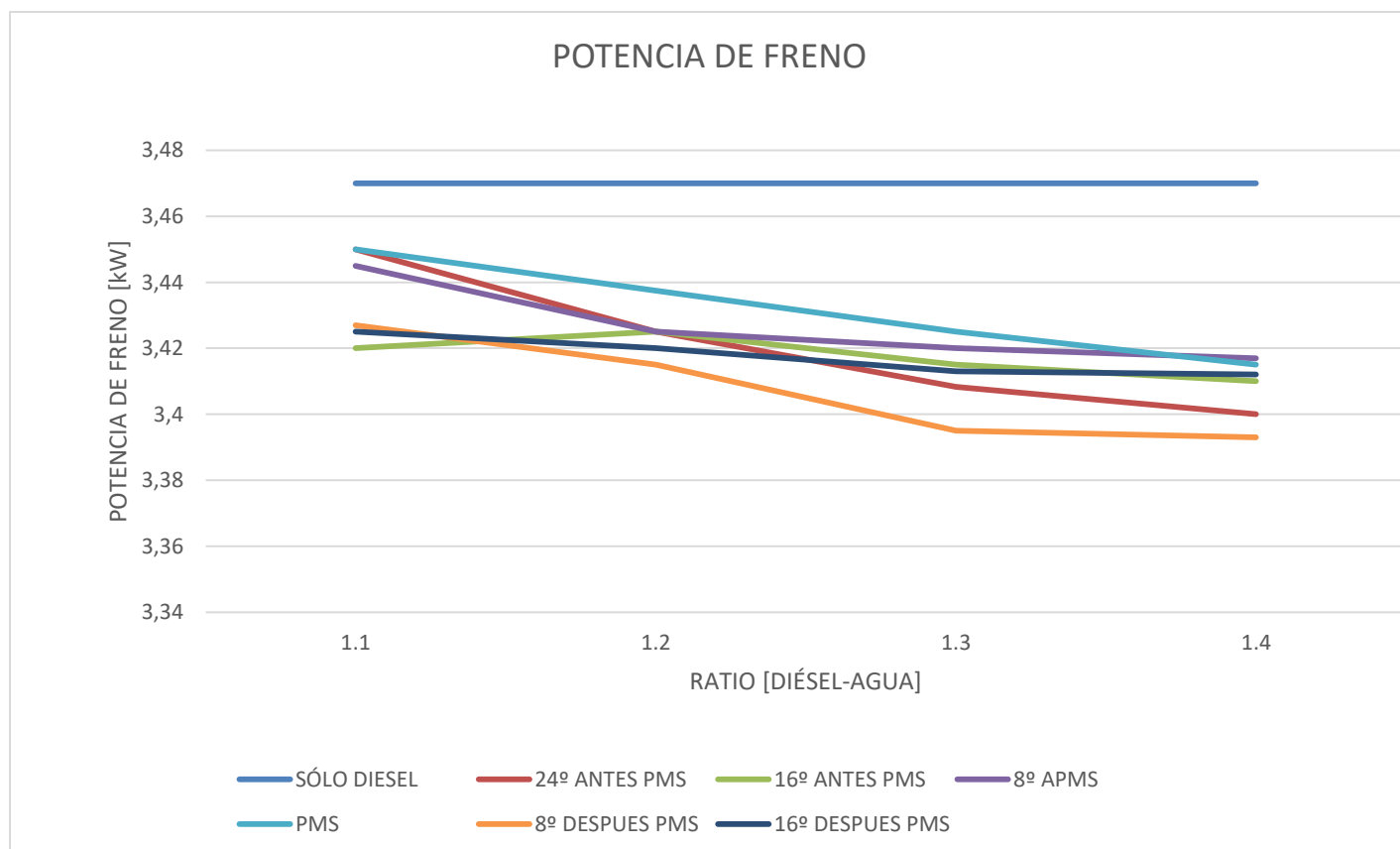


Gráfico 3 Variación de la potencia de freno (kW) [92]

RATIO	SÓLO DIÉSEL	24 ° ANTES PMS	16° ANTES PMS	8° ANTES PMS	PMS	8° DESPUÉS PMS	16° DESPUÉS PMS
1:1	3,47	3,45	3,42	3,44	3,45	3,43	3,42
1:2	3,47	3,42	3,42	3,42	3,44	3,41	3,42
1:3	3,47	3,41	3,41	3,42	3,42	3,39	3,41

1:4	3,47	3,40	3,41	3,42	3,41	3,39	3,41
-----	------	------	------	------	------	------	------

Tabla 4-4 Variación de la potencia de freno (kW) [92]

Como se puede ver en el Gráfico 3, la potencia de freno disminuye a la vez que la cantidad de agua inyectada aumenta. Esta pérdida de potencia se debe a que la temperatura en la cámara de combustión disminuye ya que el agua absorbe calor y reduce el pico de presión en el cilindro. Como conclusión, el momento en el que menos existe pérdida de potencia es justo cuando el pistón llega al punto muerto superior y se está utilizando un ratio 1-1. Sin embargo, esta pérdida de potencia no resulta demasiado significativa, ya que la mayor caída de potencia es de un 1,7%.

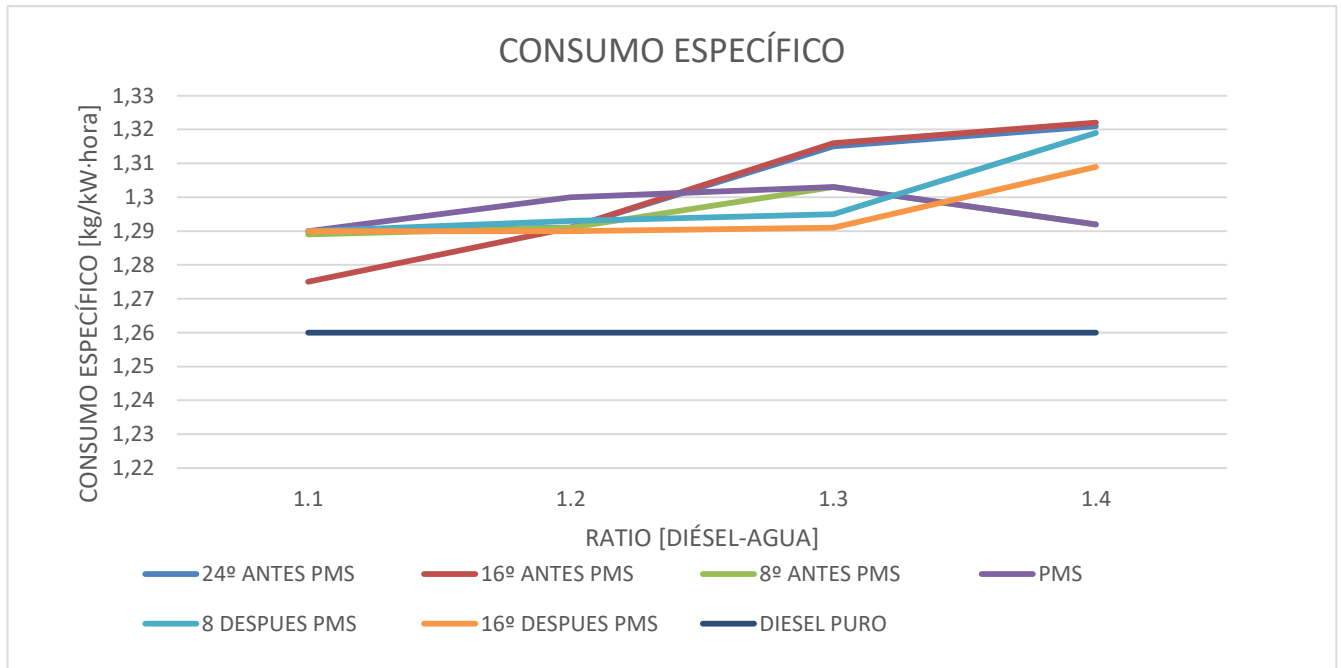


Gráfico 4 Variación del consumo específico (kg/kW·hora) [92]

RATIO	SÓLO DIÉSEL	24 ° ANTES PMS	16° ANTES PMS	8° ANTES PMS	PMS	8° DESPUÉS PMS	16° DESPUÉS PMS
1:1	1,26	1,29	1,27	1,29	1,29	1,29	1,29
1:2	1,26	1,29	1,29	1,29	1,30	1,29	1,29
1:3	1,26	1,31	1,32	1,30	1,30	1,29	1,29
1:4	1,26	1,32	1,32	1,29	1,29	1,32	1,31

Tabla 4-5 Variación del consumo específico (kg/kW·hora) [92]

Como se puede ver en el Gráfico 4, el consumo de combustible aumenta a medida que incrementa la inyección de agua. De media, el consumo aumenta entre un 12% y 20%. Esto se debe a la pérdida de calor en la cámara de combustión que produce. Por lo tanto, para mantener el mismo régimen en el motor el sistema electrónico encargado de regular el combustible aumenta la cantidad inyectada de éste para conseguir el mismo rendimiento.

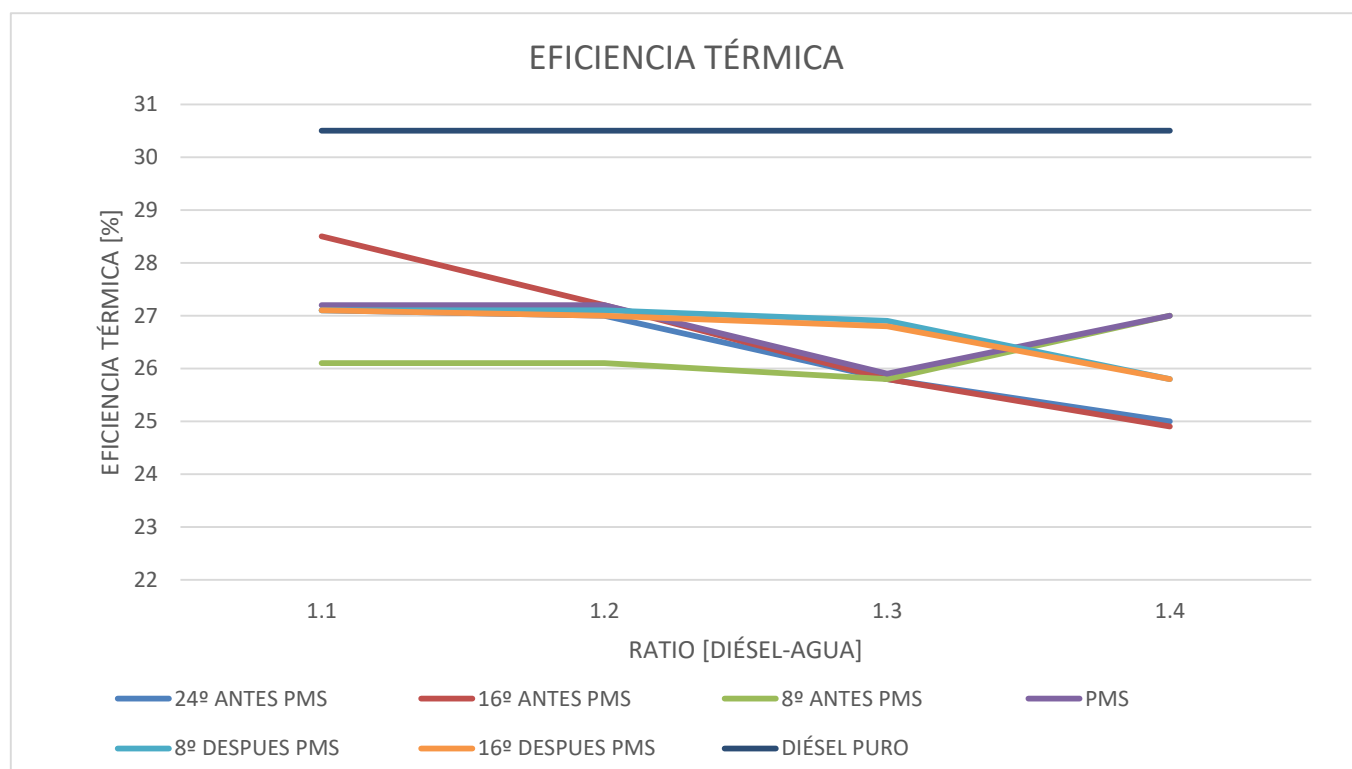


Gráfico 5 Variación de la eficiencia térmica (%) [92]

RATIO	SÓLO DIÉSEL	24 ° ANTES PMS	16° ANTES PMS	8° ANTES PMS	PMS	8° DESPUÉS PMS	16° DESPUÉS PMS
1:1	30,50	27,10	28,50	26,10	27,20	27,10	27,10
1:2	30,50	27	27,20	26,10	27,20	27,10	27
1:3	30,50	25,80	25,80	25,80	25,90	26,90	26,80
1:4	30,50	25	24,90	27	27	25,8	25,80

Tabla 4-6 Variación de la eficiencia térmica (%) [92]

Como se puede ver en el Gráfico 5, la eficiencia térmica también disminuye cuando aumenta el caudal de agua inyectada. Esto es debido a la pérdida de potencia y aumento de combustible que se produce por consecuencia de la inyección de agua.

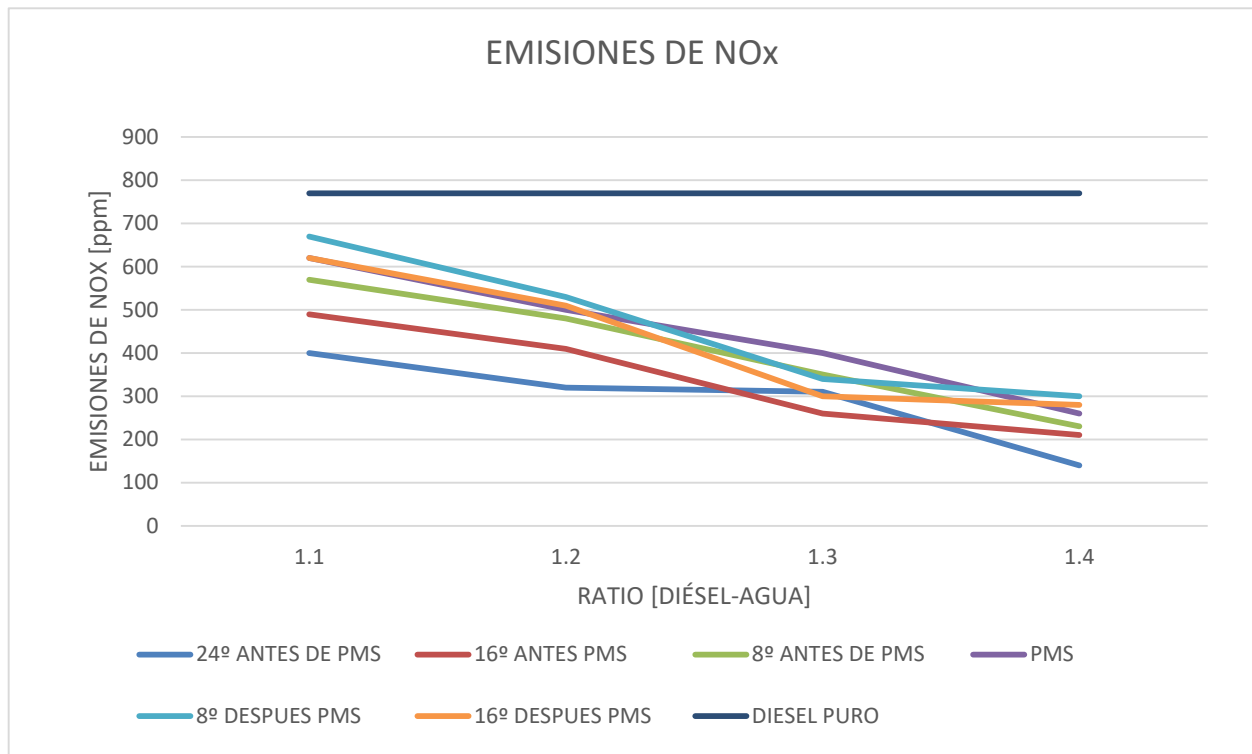


Gráfico 6 Emisiones de NO_x (ppm) [92]

RATIO	SÓLO DIÉSEL	24 ° ANTES PMS	16° ANTES PMS	8° ANTES PMS	PMS	8° DESPUÉS PMS	16° DESPUÉS PMS
1:1	770	400	490	570	620	670	620
1:2	770	320	410	480	500	530	510
1:3	770	310	260	350	400	340	300
1:4	770	140	210	230	260	300	280

Tabla 4-7 Emisiones de NO_x (ppm) [92]

Tal como refleja el Gráfico 6, se consiguen reducir considerablemente las emisiones de NO_x gracias a la inyección de agua. Inyectar agua antes de que el pistón llegue al punto muerto superior resulta más eficiente. La manera más eficiente de eliminar las emisiones de NO_x resulta cuando el agua se introduce 24° antes del punto muerto superior reduciéndolas un 84 %. Esto es debido a que gracias al agua se disminuye la temperatura de los gases de combustión ya que el agua absorbe parte del calor de la cámara de combustión.

Aunque las emisiones de NO_x disminuyeron, las emisiones de hidrocarburos y monóxido de carbono aumentaron con el incremento de agua inyectada.

Analizando los resultados obtenidos se puede concluir que al introducir el agua en la cámara de combustión previamente a la llegada del pistón del punto muerto superior se obtienen mejores resultados para la reducción de emisiones de NO_x. Además, a medida que aumenta la cantidad de agua, aunque se

produzca una menor emisión de NO_x, los demás parámetros se verán afectados sustancialmente. Por lo tanto, se descarta de esta manera las opciones de inyección directa de agua en el PMS y después del PMS y los ratios 1-3 y 1-4.

Para la elección de la mejor forma de reducir las emisiones de NO_x, se realiza un gráfico ilustrativo a modo de facilitar la selección entre los 3 momentos de inyección de agua (24° antes PMS, 16° antes PMS y 8° antes PMS) y los diferentes ratios (1-1 y 1-2).

	POTENCIA DE FRENO [kW]	CONSUMO ESPECÍFICO [kg/kW·hora]	EFICIENCIA TÉRMICA [%]	EMISIONES NO _x [ppm]
24° PMS (1:1)	3,45	1,29	28,5	400
24° PMS (1:2)	3,42	1,29	27,2	320
16° PMS (1:1)	3,42	1,27	26,1	490
16° PMS (1:2)	3,425	1,29	26,1	410
8° PMS (1:1)	3,44	1,28	27,2	570
8° PMS (1:2)	3,42	1,29	27,2	480
SÓLO DIÉSEL	3,47	1,26	30,5	770

Tabla 4-8 Tabla comparativa entre distintos momentos de inyección de agua y ratio

En rojo se resaltan las dos opciones cuyos parámetros se ven menos afectados de todas las demás.

Se elige introducir el agua 24° antes del punto muerto superior y con un ratio de 1-1, ya que la eficiencia térmica y la potencia de freno son las menos afectadas y se consiguen disminuir las emisiones de NO_x sustancialmente, concretamente, un 48%. Sin embargo, se necesita como mínimo una reducción del 73 % de emisiones de NO_x. Por lo tanto, se deberá implementar el sistema con otra tecnología si uno de los objetivos principales es afectar lo menos posible la potencia, el consumo y la eficiencia térmica.

Por otra parte, para cumplir con el objetivo de reducir las emisiones de NO_x, se podría optar por inyectar agua usando un ratio 1-4 y 16° antes del punto muerto superior sacrificando las prestaciones del motor y el consumo pero consiguiendo una reducción del 73 % de emisiones de NO_x. Además, existe la posibilidad de instalar una unidad de control electrónico y poder realizar cambios en el caudal y el momento de inyección. De esta manera, se podría incrementar el ratio cuando se necesite para que el buque pueda navegar en zonas de control de emisiones.

Desde el punto de vista económico para una plataforma que fuera a adoptar este sistema, habría que evaluar si le compensaría cambiar el motor en cuestión o realizar una mejora adaptando el motor para que utilizara inyección de agua. Además, es importante tener en cuenta que con este método el gasto de combustible es mayor, por lo tanto, se procederá a realizar un cálculo estimado de cuanto supondría la diferencia de combustible.

Para estudiar la viabilidad de aplicación de este sistema en un motor diésel, se analizan cuáles serían los posibles subsistemas o elementos requeridos. Se establece una lista especificando los elementos que se necesitan:

- El agua inyectada en la cámara de combustión debe ser agua destilada. Teniendo en cuenta que la mayoría de buques poseen plantas de ósmosis inversa para producir agua desionizada, se podría estudiar la posibilidad de utilizar el agua desionizada. Aunque en el agua desionizada no se encuentran impurezas, puede contener pequeñas cantidades de compuestos orgánicos que no se eliminan en el proceso de desionización [93].
- Un depósito encargado de almacenar el agua ya desionizada.
- Un filtro colocado justo después del depósito de agua para eliminar impurezas que puedan ocasionar daños en el motor o adyacentes.
- Una bomba de transferencia que se encargue de succionar el agua desde el depósito a través del filtro y enviarlo a la bomba de alta presión.
- Una bomba de alta presión para suministrar la presión necesaria al agua.
- En cuanto al sistema de inyección, se propone acondicionar un sistema de inyección common rail para ser utilizado para inyectar agua. En la Figura 4-3 se muestra de manera general como sería el sistema asociado a la inyección de agua.
- EDC: unidad de control electrónico cuyo objetivo es el control de la cantidad de inyección y la regulación del momento de inyección [94].
- Al añadir inyectores por cada cilindro, la culata debe cambiarse para poder alojar a los inyectores de agua tal y como se ve en la Figura 4-4.

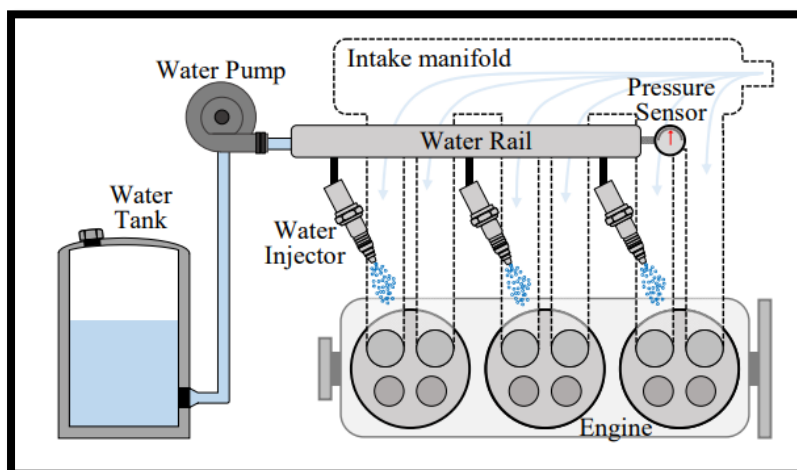


Figura 4-3 Esquema del método de inyección de agua elegido [103]

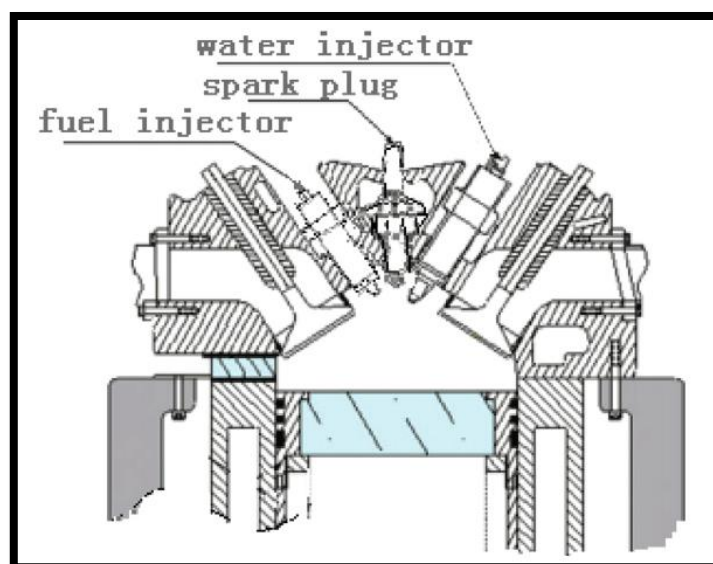


Figura 4-4 Esquema de la culata con los inyectores de agua [104]

A continuación, se realiza una estimación general sobre el sobreprecio que generaría el aumento de combustible.

Para la inyección de agua 24° antes del punto muerto superior y con un ratio diésel-agua de 1-2 el consumo de combustible aumenta en un 2,4%. Por lo tanto, se analizará cuanto aumentará el presupuesto para suplir la demanda de combustible con los motores usando inyección de agua. Para ello, se usará información de las sobre el consumo de combustible de los BAM utilizando sólo los motores diésel para la propulsión de la plataforma sin tener en cuenta las turbinas. Además, se tendrá en cuenta el uso de combustible para los diésel generadores, es decir, el consumo de éstos ya están incluidos en la tabla.

PALANCA	VELOCIDAD (NUDOS)	CONSUMO HORA (l)	X2 (l)	CONSUMO DÍA (l)	l/MILLAS
42	10	396	792	19000	79.2
	11	416	832	19960	76
52	12	446	892	21400	74
	13	496	992	23800	76
55	14	596	1192	28600	85
	15	696	1392	35600	93
63	16	846	1692	40600	106
	17	1196	2392	57400	141
72	18	1346	2692	64400	150

Tabla 4-9 Consumo de los motores diésel de un BAM

Normalmente, para velocidades de crucero se navega con propulsión diésel, ya que el consumo es menor. Por otro lado, cuando la misión requiere que se supere la velocidad máxima de crucero, se procede a cambio a propulsión por turbina.

Para realizar un cálculo estimado de cuanto supondría el uso de inyección de agua se eligen dos navegaciones de tránsito con velocidades de crucero (13 nudos). De esta manera, el cálculo es más exacto ya que el buque no va a utilizar las turbinas. Se utilizará el precio del combustible DFM F76 para el año 2022 de la empresa Repsol que es el proveedor de todos los puertos nacionales (700€/CUM, teniendo en cuenta que 1 CUM equivalen a 1000 l de combustible).

TRAYECTO	MILLAS NAVEGADAS	CONSUMO SIN DWI (l)	CONSUMO CON DWI (l)	PRESUPUESTO SIN DWI (€)	PRESUPUESTO CON DWI (€)
Graña-Rota	585	44460	45531	31122	31872
Málaga-Ferrol	780	59280	60708	41496	42496

Tabla 4-10 Comparación económica entre motor con sistema DWI y sin DWI

Como refleja la Tabla 4-10, la diferencia en cuanto a gasto económico no es excesiva. Sin embargo, teniendo en cuenta que la vida operativa de la fragata está estimada en unos 30 años, es obvio que a largo plazo la diferencia económica será notable y teniendo en cuenta que los motores diésel propulsores son usados principalmente en la propulsión de la fragata ya que las turbinas sólo entran en funcionamiento para velocidades relativamente altas en determinadas circunstancias.

Por otra parte, habría que estimar el consumo de agua que conlleva este sistema. Al utilizar el ratio 1-2, por cada litro de combustible que consuma el motor habría que inyectar dos litros de agua. Por lo tanto, se hará la equivalencia usando los datos de consumo de navegaciones de tránsito.

TRAYECTO	MILLAS NAVEGADAS	HORAS ESTIMADAS DE NAVEGACIÓN (13 NUDOS)	CONSUMO DFM F76 (l)	CONSUMO AGUA (L) (RATIO 1-2)
Graña-Rota	585	45	45531	91063
Málaga-Ferrol	780	60	60708	121417

Tabla 4-11 Consumo estimado de agua usando DWI

Los BAM poseen 2 desalinizadores de agua de mar, que funcionan según el principio de la ósmosis inversa, del fabricante Peter Taboada que poseen una capacidad de tratar 15000 litros de agua al día cada uno. En total, resulta una capacidad de 1250 litros de agua a la hora [95].

CAPACIDAD DE CREACIÓN DE AGUA (l/HORA)	CONSUMO DE AGUA PARA VELOCIDAD DE CRUCERO (l/HORA)
1250	2024

Tabla 4-12 Estimación de agua restante no destinada a DWI

Por lo tanto, debido a la capacidad de generar agua para el sistema de inyección que resulta insuficiente para un uso constante del sistema de inyección de agua, podría utilizarse sólo cuando el buque necesite restringir sus emisiones de NO_x, por ejemplo, cuando navegue por zonas de control de emisiones o estudiar la posibilidad de instalar otro par más de desalinizadores de agua de mar.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

La Armada Española, a pesar de que no tiene como obligación cumplir con el Convenio MARPOL en cuanto a emisiones contaminantes, sí está involucrada en conseguir una gestión ambiental eficaz, logrando que la sociedad tenga una imagen clara y nítida de una armada que apuesta por el medio ambiente. Por lo que, está dando los pasos adecuados en esa dirección.

Existen diferentes formas de reducir las emisiones contaminantes, principalmente SO_x y NO_x, creadas por los gases de escape de los motores diésel:

- A día de hoy, la Armada Española posee combustibles que cumplen con la normativa vigente. De esta manera, se afirma que se cumple con las restricciones impuestas a los SO_x.
- Por otro lado, existen buques en la flota a los que le afectan los niveles más restrictivos respecto a las emisiones de NO_x, nivel II y III.
 - o Actualmente, el nivel II puede cumplirse con motores de última tecnología.
 - o Sin embargo, para cumplir el nivel III son necesarios sistemas más complejos: el uso de sistemas de reducción catalítica selectiva; o bien la instalación del sistema de inyección de agua directa en los motores diésel de los buques, que aunque sea un sistema eficaz su uso en motores, provoca una ligera disminución en sus parámetros tales como la potencia o el consumo de combustible.

5.2 Líneas futuras

Por lo tanto, se establecen de la siguiente manera las posibles líneas futuras:

- Investigar y desarrollar sobre las distintas tecnologías de reducción de sistemas que en combinación podrían presentarse como una alternativa a los actuales sistemas que cumplen el nivel III de restricciones tales como el SCR.
- Diseñar y estudiar la viabilidad económica de un sistema de inyección directa de agua en la cámara de combustión ya que por falta de tiempo no se ha podido realizar un presupuesto que pueda compararse con el sistema SCR y poder establecer una comparación en el factor económico.
- Diseñar y estudiar la viabilidad económica de un sistema de inyección de agua en el conducto de aire admisión que junto a otra tecnología de reducción de emisiones permita reducir considerablemente los niveles de NO_x de los gases de escape de los motores diésel.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. S. Gómez-López, «Crecimiento económico, consumo de energía y emisiones contaminantes en la economía mexicana,» n° 3, pp. 67-80, 2011.
- [2] E. d. B. V. C. Universitario, «Blog BV eLearning,» 10 Marzo 2015. [En línea]. Available: <https://blogbvelearning.wordpress.com/2015/03/10/el-transporte-sector-estrategico-para-el-desarrollo-global-de-la-economia/>. [Último acceso: 1 Febrero 2022].
- [3] «Resolución del Parlamento Europeo, de 27 de abril de 2021, sobre medidas técnicas y operativas para un transporte marítimo más eficiente y limpio (2019/2193(INI)),» 27 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:52021IP0131>. [Último acceso: 1 Febrero 2022].
- [4] «Observatorio Transporte, Ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana, Cuotas Modales del transporte de mercancías,» 2020. [En línea]. Available: <https://observatoriotransporte.mitma.es/inform/es/2020/la-movilidad/-reparto-modal/cuotas-modales-del-transporte-de-mercancias->. [Último acceso: 6 Enero 2022].
- [5] T. Takaishi, R. Nakano, A. Numata y K. Sakaguchi, «Approach to High Efficiency Diesel and Gas Engines,» vol. 45, n° 1, pp. 21-24, Marzo 2008.
- [6] «Fondear,» 2007. [En línea]. Available: http://www.fondear.org/infonautic/Barco/Motores_Helices/Motor_Diesel/Motor_Diesel.htm. [Último acceso: 6 Enero 2022].
- [7] «OMI,» [En línea]. Available: [https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/es/About/Conventions/Paginas/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx). [Último acceso: 11 Marzo 2022].
- [8] E.E "Antonio Escaño", *El medio ambiente en la armada*, Ferrol, 2008.
- [9] C. (. D. J. M. Pernas Urrutia, «Aplicación del Anexo VI del Convenio MARPOL al buque de guerra,» *Boletín Técnico de Ingeniería*, n° 21, Diciembre 2021.
- [10] «Eur-Lex,» [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:4413653>. [Último acceso: 3 Febrero 2022].
- [11] «United Nations Climate Change,» [En línea]. Available: <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>. [Último acceso: 3 Febrero 2022].
- [12] «Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Sustancias que agotan la capa de ozono,» [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion->

- ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/agotadores_capa_ozono.aspx. [Último acceso: 3 Febrero 2022].
- [13] Á. Pérez Pro, *Análisis de la aplicación del Anexo VI del Convenio MARPOL en la flota española*, Barcelona, 2014.
- [14] «Wärtsilä,» [En línea]. Available: <https://www.wartsila.com/sustainability/innovating-for-sustainability/reducing-emissions-to-air>. [Último acceso: 10 Febrero 2022].
- [15] «iContainers,» [En línea]. Available: <https://www.icontainers.com/es/2019/07/30/imo-2020-y-su-impacto-en-el-transporte-maritimo/>. [Último acceso: 10 Febrero 2022].
- [16] *Enmiendas al Código Técnico relativo al control de las emisiones de óxidos de nitrógeno de los motores diésel marinos (Código Técnico sobre los NOx 2008)*, 2011.
- [17] *DIRECTIVA (UE) 2016/802*, 2016.
- [18] R. García Soutullo, «Ingeniero Marino,» 14 Diciembre 2016. [En línea]. Available: https://ingenieromarino.com/normativa-tecnologias-y-modificaciones-para-reducir-las-emisiones-de-sox-y-nox-a-la-atmosfera/#24-Inyeccion_de_Agua_en_el_Aire_de_Admision_HAM-Humid_Air_Motor. [Último acceso: 16 Febrero 2022].
- [19] N. Alonso Sopeña, C. Riestra López, I. L. Mateos Aparicio, C. Quaassdorff y E. Prieto Redondo, *Programa Nacional de Control de la Contaminación Atmosférica*, 2019.
- [20] 8 Noviembre 2012. [En línea]. Available: https://navarrof.orgfree.com/Docencia/Termodinamica/CiclosGeneracion/ciclo_diesel.htm. [Último acceso: 7 Marzo 2022].
- [21] D. Cabronero Mesas, *Motores de combustión interna*, Barcelona, 1995.
- [22] D. J. Ramírez Ante, *Análisis de eficiencia energética del ciclo diésel*, Ibarra, 2018.
- [23] «Que es una cámara térmica,» [En línea]. Available: <https://sites.google.com/site/queesunamaquinatermica/combustion-interna/4-1-el-motor-de-4-tiempos>. [Último acceso: 9 Febrero 2022].
- [24] A. Juárez, «Planeta Camión,» [En línea]. Available: <https://www.planetacamion.com.ar/turbos-diesel-razon-de-ser-cuidados-mantenimiento/>. [Último acceso: 7 Marzo 2022].
- [25] O. Armas Vergel y R. Ballesteros Yáñez, *Motores de combustión interna alternativos*, Reverté, 2011.
- [26] «Armada Española,» [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/buquessuperficie/prefLang-es/17lamina>. [Último acceso: 4 Marzo 2022].
- [27] A. Alday Rueda, E. Díaz Alcarazo, I. Eizmendi Gallastegui y J. Urrejola Gorrochategui, *Propulsión naval con turbina de gas*, Bilbao, 2014.
- [28] J. Egüen Sánchez, *Estudio técnico del cambio de combustible HSFO/LSFO en un buque petrolero debido a navegación en zona SECA*, Cantabria, 2015.
- [29] «Energía y minería en Castilla León,» [En línea]. Available: <https://energia.jcyl.es/web/es/biblioteca/productos-destilacion-petroleo-crudo.html>. [Último acceso: 1 Febrero 2022].
- [30] «International Energy Agency,» [En línea]. Available: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/oil>. [Último acceso: 2 Febrero 2022].
- [31] A. C. D. Pino, *Proceso de refinado del petróleo para la obtención de combustibles marinos*, Barcelona, 2014.

- [32] M. P. Ortega Monserrat, *Aportación a la investigación sobre la reducción de las emisiones de NOx en grupos diesel utilizados para generación de energía eléctrica*, Las Palmas de Gran Canaria, 2014.
- [33] J. P. Llop Sayson, *Adaptación de un buque para consumir fuel-oil de bajo contenido en azufre*, Barcelona, 2017.
- [34] R. García Soutullo, «Ingeniero Marino,» [En línea]. Available: <https://ingenieromarino.com/normativa-tecnologias-y-modificaciones-para-reducir-las-emisiones-de-sox-y-nox-a-la-atmosfera/>. [Último acceso: 9 Febrero 2022].
- [35] A. García Coterillo, *Estudio sobre la reducción de emisiones de NOx y SOx*, Santander, 2018.
- [36] J. J. Corbett, J. J. Winebrake, E. W. Carr, J.-P. Jalkanen, L. Johansson, M. Prank y M. Sofiev, *Health Impacts Associated with Delay of MARPOL Global Sulphur Standards*, 2016.
- [37] «Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Óxidos de nitrógeno,» [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/oxidos-nitrogeno.aspx>. [Último acceso: 2 Febrero 2022].
- [38] F. Payri González y J. M. Desantes Fernández, *Motores de combustión interna alternativos*, Valencia: Universidad Politecnica de Valencia, 2012.
- [39] J. Á. Mesa Márquez y H. J. Correa Molina, *Sistemas de control de emisiones en el buque tanque "Hespérides"*, 2016.
- [40] International Maritime Organization, *Air pollution and energy efficiency. Study on effects of the entry into force of the global 0.5% fuel oil sulphur content limit on human health*, 2016.
- [41] K. O. Blumberg, M. P. Walsh y C. Pera, *Gasolina y diesel de bajo azufre: la clave para disminuir las emisiones vehiculares*, 2003.
- [42] «Repsol,» [En línea]. Available: <https://www.repsol.pe/es/la-pampilla/conoce-refineria-pampilla/unidades-de-produccion-de-diesel/index.cshtml>. [Último acceso: 02 Febrero 2022].
- [43] I. B. Benavides Cevallos y S. E. Jácome Mayasa, *Diseño y simulación de la unidad de hidrodesulfuración de diésel para una nueva refinería*, Quito, 2016.
- [44] B. Basco, «e-Automotive,» 12 Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://noticias-renting.aldautomotive.es/produccion-hidrogeno-automocion/>. [Último acceso: 11 Febrero 2022].
- [45] E. Corral Rozalem, *Estudio de la propulsión a gas en buques militares. Aplicabilidad a la Armada Española*, Marín, 2021.
- [46] «HAM,» [En línea]. Available: <https://www.ham.es/que-es-el-gnl/>. [Último acceso: 22 Marzo 2022].
- [47] J. C. Díaz Lorenzo, «Puente de mando,» 27 Octubre 2016. [En línea]. Available: <https://www.puentedemando.com/navantia-presenta-el-motor-dual-que-adoptara-fred-olsen/>. [Último acceso: 10 Marzo 2022].
- [48] M. S. Alvarez Alvarado, M. X. Pacheco Hurtado y J. Urquiza Calderón, *Proceso de producción de biodiesel usando aceite de jatropha curcas y su uso en generación térmica de las Islas Galápagos. Aspectos técnicos y económicos*, Guayaquil, 2011.
- [49] R. Piloto Rodríguez, R. Sierens, S. Verhelst y N. Ferrer Frontela, «Evaluación del funcionamiento de motores de combustión interna trabajando con biodiesel,» 2008.
- [50] I. E. Medina Ramírez, N. A. Chávez Vela y J. Jáuregui Rincón, *Biodiesel, un combustible renovable*.

- [51] C. Otones Vega, «ainenergia,» 1 Noviembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.ainenergia.com/proceso-fischer-tropsch-historia/>. [Último acceso: 14 Marzo 2022].
- [52] P. Norton, K. Vertin, B. Bailey, N. N. Clark, D. W. Lyons, S. Goguen y J. Eberhardt, *Emissions from trucks using Fischer-Tropsch Diesel Fuel*, San Francisco, 1998.
- [53] D. Villareal, «Diario Motor,» 7 Octubre 2015. [En línea]. Available: <https://www.diariomotor.com/2015/10/07/bmw-inyeccion-de-agua-m4-gts/>. [Último acceso: 7 Octubre 2022].
- [54] G. Erazo Laverde, D. Pucují Pillajo, P. Bonilla Valladares y J. Naranjo Hernández, «Emulsión Agua y Diésel Formulación y características Físicas para su utilización en motores de Combustión Interna,» vol. 10, 2016.
- [55] J. A. Angamarca Panamito y C. R. Soto Ocampo, *Estudio de los efectos de la EGR sobre la combustión, de un motor de encendido por compresión CRDI Hyundai Santa Fé 2.0, mediante el análisis de vibraciones*, Cuenca, 2015.
- [56] B. Pla Moreno, *Análisis del proceso de recirculación de los gases de escape de baja presión en motores diésel sobrealimentados*, Valencia, 2009.
- [57] H. Peña Alemán, *Ingeniería marina: medidas para la reducción de gases contaminantes en motores marinos*, La Coruña, 2016.
- [58] L. F. Larrea Santa Cruz, *Diseño de un sistema de inyección mixta agua-combustible para un motor Diésel y mejorar la eficiencia del grupo electrogeno de la Central Termica de Reserva Fria Eten*, Lambayeque - Perú, 2019.
- [59] «conservatucoche,» [En línea]. Available: <https://www.conservatucoche.com/es/motor/valvula-egr-que-es-y-como-funciona-32.html>. [Último acceso: 21 Febrero 2022].
- [60] J. A. Soler Muniesa, *Análisis de la combinación de los sistemas de recirculación de gases de Alta y Baja presión sobre el comportamiento de un motor Diésel sobrealimentado*, Valencia, 2016.
- [61] J. Navarrete, «ActualidadMotor,» [En línea]. Available: <https://www.actualidadmotor.com/valvula-egr-que-es-funcionamiento-averias/>. [Último acceso: 28 Febrero 2022].
- [62] P. C. López, *Aplicación de la medida de NOx para el control de motores diésel sobrealimentados*, Valencia, 2013.
- [63] C. G. Rodríguez Vidal y M. I. Lamas Galdo, *Análisis CFD de emisiones contaminantes en el motor diésel Wäertsilä. Evaluación de diversas modificaciones internas*.
- [64] M. D. Papers, *Common rail. Less consumption. Less soot. Less NOx.*
- [65] Bosch, *Sistema de inyección Diesel por acumulador Common Rail*, 2005.
- [66] F. Comaleras, «Blog Mecánicos,» 18 Octubre 2019. [En línea]. Available: http://www.blogmecanicos.com/2019/10/ciclo-miller_18.html. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [67] I. Lamas, «Techincal Courses,» 11 Abril 2014. [En línea]. Available: http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_entrada.php?entrada_id=47. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [68] V. A. Elis Revolorio, *Ventajas de un ciclo Miller frente a un ciclo diesel, en motores de combustión interna, en sistemas electrógenos estacionarios de baja velocidad*, Guatemala, 2010.

- [69] «Car and driver,» 5 Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.caranddriver.com/es/coches/planeta-motor/a29412215/adblue-que-es-aditivo-diesel/>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [70] C. Ortiz Ruiz, *Análisis de sistemas de reducción catalítica selectiva con inyección de urea mediante CFD*, Valencia, 2018.
- [71] H. &. MAN-B&W, *Emission project guide*. MAN Energy Solutions, 2012.
- [72] «Volkswagen,» [En línea]. Available: <https://www.valladolidwagen.es/inicio/noticias/articulo/que-es-el-adblue/contenido/4000>. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [73] «ABC,» 14 Agosto 2018. [En línea]. Available: https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-adblue-aditivo-disminuye-contaminacion-diesel-201808140236_noticia.html. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [74] A. Humberto Peña, *"Ingeniería marina: medidas para la reducción de gases contaminantes en motores marinos"*, La Coruña, 2016.
- [75] MAN Diesel & Turbo, 2019.
- [76] S. Baña Pérez, *Sistema SCR para el control de emisiones*, La Coruña, 2021.
- [77] W. A. Majewski, «DieselNet,» [En línea]. Available: https://dieselnet.com/tech/cat_scr_diesel_urea_dosing.php. [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [78] U. De La Torre Larrañaga, *Sistemas SCR y NSR-SCR para DeNOx en corrientes de escape diésel: Formulacións, cinética y modelización*, Leioa, 2015.
- [79] J. A. Giménez Mañogil, *Desarrollo de catalizadores basados en Cu/ceria-zirconia para la combustión de carbonilla y eliminación de NOx en motores diésel*, Alicante, 2017.
- [80] B. Sabrina Sánchez, *Catalizadores Pt, Rh, K soportados en La2O3 y CeO2 para eliminación de hollín y óxidos de nitrógeno*.
- [81] Y. Portilla Nieto, *Envejecimiento hidrotérmico de sistemas híbridos NSR-SCR para aplicaciones DeNOx*, Leioa, 2016.
- [82] B. Pereda-Ayo, D. Duraiswami y J. R. González-Velasco, *Control of NOx storage and reduction in NSR bed for designing combined NSR-SCR systems*, Leioa, 2011.
- [83] J. C. Diaz Lorenzo, «Aumenta la preferencia por la instalación de scrubbers,» 11 Diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.puentedemandando.com/aumenta-la-preferencia-por-la-instalacion-de-scrubbers/>. [Último acceso: 3 Marzo 2022].
- [84] M. Sin, *Instalación y análisis de un sistema de limpieza de gases de escape para un buque Ro-Ro*, Barcelona, 2014.
- [85] *MIL-DTL-16884P*, 2017.
- [86] Jefatura del Servicio de Combustibles, *Precios sobre combustible de uso en la Armada Española*.
- [87] *ISO 8217 2017 REQUIREMENTS FOR MARINE DISTILLATE FUELS*.
- [88] G. Talavera Cejudo, *Estudio de emisiones de buques de la Armada y viabilidad de la implantación de catalizadores heterogéneos para reducir su impacto ambiental*, Pontevedra, 2019.
- [89] Wärtsilä, *Wärtsilä 38. Technology review*.
- [90] C. R. Hernández Roca, *Estudio de ciclo de vida de las fragatas clase "Álvaro de Bazán" F-100*, Marín, 2016.
- [91] A. Ruiz Saráchaga, *Cálculo y diseño de un sistema de reducción de NOx para un motor de 4T*, Santander, 2012.

- [92] H. S. Prasad, V. S. Vijay y J. Gonsalvis, *Effect of direct water injection at different crank angles on diesel engine emission and performance*, 2018.
- [93] «tp.multiaqua,» 15 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://tpmultiaqua.com/es-igual-agua-destilada-que-agua-desionizada/#:~:text=%C2%BFes%20lo%20mismo%20hablar%20de,en%20el%20proceso%20de%20desionizaci%C3%B3n..> [Último acceso: 10 Marzo 2022].
- [94] H. F. Ortiz Sanmartín, *Análisis del sistema de inyección directa common rail en un motor MAN*, Cuenca, 2014.
- [95] Dirección de construcciones de la JAL, *Desalinizador de agua de mar por ósmosis inversa*.
- [96] C. d. F. C. B. Ojeda, *Introducción a las plantas de propulsión naval*, Callao, 2013.
- [97] «Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Compuestos orgánicos volátiles,» [En línea]. Available: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/act-emis/compuestos_organicos_volatiles.aspx. [Último acceso: 20 Enero 2022].
- [98] A. A. Acosta Herrera, *Desulfuración y desnitrógenación de un diésel mediante carbón activo modificado con (oxi)hidróxidos de Fe y Mn*, San Luis Potosí, 2017.
- [99] Ministerio de Medio Ambiente, *Guía de mejores técnicas disponibles en España del sector refino del petróleo*.
- [100] S. A. Urquijo Morales, «UdeA Noticias,» 14 Octubre 2015. [En línea]. Available: <https://portal.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/udea-noticias/udea-noticia!/ut/p/z0/rVNNc4IwEP0rXjgyCYiIR4ZRrCP129JcOilETUsShGBrf30TO2rFmXbG9pDMbrJv973NBiAQA8Txjq6xpILjTPmPyH3yOoFt-Q4cQtdxoe-OnVbbDpvzJQQDgL4HhNNBoAICv9ueLS3nztEZ6Mt2i3yAEsEleZcgzkUhc>. [Último acceso: 16 Febrero 2022].
- [101] J. M. Navarro García, «Defensa,» 12 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.defensa.com/espana/n-25-millones-litros-combustible-diesel-naval-para-armada-espanola>. [Último acceso: 18 Febrero 2022].
- [102] F. Yarlequé Chocas, *Sistema de inyección common rail*.
- [103] F. Millo, F. Gullino y L. Rolando, *Methodological approach for 1D simulation of port water injection for knock mitigation in a turbocharged DISI engine*, Torino, 2020.
- [104] W. Mingrui, N. Thanh Sa, R. Fiifi Turkson, L. Jinping y G. Guanlun, «Water injection for higher engine performance and lower emissions,» 7 Enero 2016.