



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación de combustibles alternativos y tecnologías para la
reducción de emisiones en la propulsión de fragatas*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Federico Mercado Caballero

DIRECTORES: Lorena González Gil
Lara Febrero Garrido

CURSO ACADÉMICO: 2021-2022

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Evaluación de combustibles alternativos y tecnologías para la
reducción de emisiones en la propulsión de fragatas*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

La emisión de sustancias perjudiciales para el medio ambiente y para la salud humana, es un factor que no pasa desapercibido. Es por ello que la OMI impone restricciones a través del convenio MARPOL, obligando a cumplirlas a todo aquel que transite por la vía marítima. Aunque los diferentes sistemas de propulsión de los buques de guerra no lo cumplen, estos deberían de actuar con responsabilidad frente a estas prohibiciones, adaptando su propulsión al cumplimiento de estos exigentes requisitos. Por esta razón, las diferentes armadas del mundo tienen que comprometerse a incorporar sistemas que permitan navegar sin contaminar para alcanzar un entorno marítimo sostenible.

En el estudio realizado en este trabajo, se pretende realizar un análisis de emisiones, en concreto de las fragatas F-100 españolas, evaluando combustibles alternativos que tengan un apoyo científico contrastado y también una evaluación de sistemas de tratamiento de gases de exhaustación para el cumplimiento de la normativa. Buscando a través de este objetivo, alternativas que sean viables en términos económicos, de consumos y emisiones. Proponiendo finalmente tres tipos de soluciones: adición de biodiesel, reducción catalítica selectiva o scrubber y biometano, consiguiendo así cumplir con la normativa y haciendo que España sea un país pionero en este movimiento.

PALABRAS CLAVE

F-100, Propulsión, Emisiones, Biometano, Tratamiento Gases Escape.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a todas las personas que me han apoyado en la realización de este trabajo fin de grado y durante los 5 años de formación.

En primer lugar, agradecer a mis tutoras Lorena González Gil y Lara Febrero Garrido, por sus consejos e indicaciones durante todo el desarrollo del trabajo, sin encontrar ningún obstáculo en el transcurso del mismo.

En segundo lugar, a todo el personal que me ha ayudado en la recolección de datos, como son las empresas Hielscher Ultrasonics, Bilogistik, S. A., DAIHATSU y al personal de las distintas unidades F-85, F-104 y F-102, y también agradecer a CC Pietro Castro, a la Jefatura de Apoyo Logístico y a la Jefatura de Ingeniería, Construcciones y Obras de la Armada por los datos proporcionados acerca de la F-110.

Y finalmente, agradecer a las plantas, mi grupo de amigos, y a mi familia por el apoyo recibido durante la formación en la Escuela Naval Militar.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Introducción	7
1.2 Motivación	8
1.3 Justificación	9
1.4 Objetivos	9
1.5 Estructura	10
2 ESTADO DEL ARTE	12
2.1 Normativa en vigor	12
2.1.1 Análisis General del Convenio MARPOL	12
2.1.2 Análisis específico del Anexo VI del convenio MARPOL	14
2.1.3 Futuras enmiendas al convenio MARPOL	19
2.2 Eficiencia Energética	20
2.2.1 La Unión Europea (UE).....	21
2.2.2 Interés para la Armada.....	21
2.3 Tipos de propulsión.....	22
2.3.1 Reseña histórica	22
2.3.2 Propulsión simple actual.....	24
2.3.3 Sistemas de propulsión combinada:.....	29
3 ANÁLISIS ACTUAL DE LAS FRAGATAS ESPAÑOLAS	37
3.1 Fragatas F-100 y F-80	37
3.1.2 Combustible DFM (Diesel Fuel Marine) F-76	44
4 EVALUACIÓN DE COMBUSTIBLES Y TRATAMIENTO DE EMISIONES COMO ALTERNATIVAS	45
4.1 Combustibles.....	45
4.1.1 Biodiesel:	45
4.1.2 GNL (Gas Natural Licuado)	48
4.1.3 Biogás:	51
4.2 Técnicas de reducción de emisiones	63
4.2.1 Pretratamiento:.....	64
4.2.2 Post-tratamiento	68

5 PROPUESTAS	73
5.1 Propuesta corto plazo: Diésel F-76 con biodiesel	73
5.2 Propuesta medio plazo: Tratamiento gases de escape	77
5.2.1 Reducción Catalítica Selectiva (SCR)	79
5.2.2 Scrubber	81
5.3 Propuesta largo plazo: Biometano	86
6 Conclusiones y líneas futuras	91
6.1 Conclusiones	91
6.2 Líneas futuras	92
7 Bibliografía.....	92
Anexo I: Similitudes y diferencias entre F-110 y F-100	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 – Mapa Mundial Líneas de Transporte Marítimo [1]	7
Figura 1-2 – Emisiones Globales de CO ₂ [4]	8
Figura 1-3 – Estructura de la Memoria (elaboración propia)	10
Figura 2-1 Anexos MARPOL (elaboración propia)	13
Figura 2-2 Cumbres Naciones Unidas sobre Cambio Climático (elaboración propia)	14
Figura 2-3 – Zonas ECA y Futuras ECA [15]	17
Figura 2-4 Comparación tamaño partículas PM [17]	18
Figura 2-5 Factores de la EE (elaboración propia)	20
Figura 2-6 – Primera Representación de un Buque [31]	23
Figura 2-7 – Carabela Santísima Trinidad [32]	23
Figura 2-8 – Primer Barco Propulsado “Clermont” [33]	24
Figura 2-9 – Esquema de una Hélice [36] y de un Eje de Transmisión [35]	24
Figura 2-10 Esquema propulsiones más comunes (elaboración propia)	25
Figura 2-11 – Cilindro 2 Tiempos y 4 Tiempos [37]	25
Figura 2-12 – Propulsión diésel-eléctrico [38]	26
Figura 2-13 – Buque “Yara Birkeland” [40]	26
Figura 2-14 Esquema de una Turbina de Gas [41]	27
Figura 2-15 – HMS “Ark Royal” [43]	28
Figura 2-16 – Esquema de un Sistema Propulsor Nuclear [45]	29
Figura 2-17 Esquema CODAD [46] y corbeta clase Gowind francesa [47]	29
Figura 2-18 Esquema CODOG [46] y fragata F100 española [48]	30
Figura 2-19 Esquema CODAG [46] y fragata clase Fridtjof Nansen Noruega [49]	30
Figura 2-20 Esquema COGAG [46] y fragata MEKO 200 HN griega [50]	31
Figura 2-21 Esquema COGOG [46] y fragata tipo 42 Royal Navy [51]	32
Figura 2-22 Esquema COSAG [46] y destructor clase County chileno [52]	32
Figura 2-23 Esquema CODLAG [46] y futura fragata F110 española [53]	33
Figura 2-24 Esquema CODLOG [46] y fragata FREMM multipurpose francesa [54]	33
Figura 2-25 Figura CODOE [46] y BAM Clase Meteoro española [55]	34
Figura 2-26 Clases de buques más construidos (elaboración propia)	35
Figura 2-27 Sistema combinado más empleado (elaboración propia)	35
Figura 2-28 Figura de líneas de desarrollo (elaboración propia)	36
Figura 3-1 Fragata Canarias F-85 Clase “Santa María” [56]	37
Figura 3-2 Fragata Méndez Núñez F-104 Clase “Álvaro de Bazán” [57]	38
Figura 3-3 Dimensiones F-100 (elaboración propia)	38

Figura 3-4 Corte [58] y Vista Lateral Motor Diésel Bazán Bravo-12 [58]	40
Figura 3-5 Turbina [58] y Modulo con Turbina LM2500 [58]	41
Figura 3-6 Sistema CODOG de las F-100 españolas [59]	42
Figura 3-7 Pictograma de Peligro del F-76 [61].....	44
Figura 4-1 Pronostico de producción mundial de petróleo basado en el escenario actual [63]	45
Figura 4-2 Ciclo Biodiesel [64].....	46
Figura 4-3 Transesterificación [65].....	46
Figura 4-4 Comparativa de Precios de GNL [67]	48
Figura 4-5 Estaciones de Regasificación en España [70].....	49
Figura 4-6 Barreras para GNL (elaboración propia basado en [71]).....	50
Figura 4-7 Portavehiculos Ro-Ro de la Empresa Balearia [72]	50
Figura 4-8 Proyecto de Navantia para Transporte Logistico con GNL [73].....	51
Figura 4-9 Principales Etapas en Digestión Anaerobia [76]	53
Figura 4-10 Esquema generalizado de obtención de biogás (elaboración propia).....	55
Figura 4-11 Usos y Tratamientos del Biogás [74].....	55
Figura 4-12 Proceso obtención biometano (elaboración propia)	56
Figura 4-13 Plantas de biometano en España 2022 [80]	58
Figura 4-14 Distribución plantas de biometano en 2022 (izquierda) en 2023 (derecha) (elaboración propia)	58
Figura 4-15 Distribución plantas biometano previstas en 2024 (elaboración propia).....	59
Figura 4-16 Comparación de emisiones de CO ₂ (elaboración propia).....	60
Figura 4-17 Costos específicos de mejoramiento de biogás (elaboración propia).....	61
Figura 4-18 “Hurtigruten” [85]	62
Figura 4-19 Ferry con biometano “Eleanor Roosevelt” [88] a la izquierda y barcaza de combustible Bio2Bunker [89] a la derecha	63
Figura 4-20 Esquema EGR Recirculación de Gases [91]	64
Figura 4-21 Comparación con y sin DWI [93].....	65
Figura 4-22 Distribución de Estructuras Moleculares de Azufre en Diésel Convencional con la Muestra Diésel C (0,1867%azufre/L) [95]	67
Figura 4-23 Cromatogramas del diésel original, diésel oxidado y diésel desulfurado [95]	67
Figura 4-24 Desulfuración oxidativa con UIP16000 [96].....	68
Figura 4-25 Esquema Reducción Catalítica Selectiva [98].....	69
Figura 4-26 Esquema Scrubber [138].....	70
Figura 4-27 Buque “MT Suula” [104]	72
Figura 5-1 Previsión del consumo de energía primaria para 2035 [105]	73
Figura 5-2 Relación emisiones con biodiesel [110]	75
Figura 5-3 Fragata F100 española con escape de gases señalados [113].....	77

Figura 5-4 Plano de salida del escape del motor diésel propulsor de la cámara de máquinas N°1 a la izquierda y del motor diésel propulsor de la cámara de máquinas N°2 a la derecha [58]	78
Figura 5-5 Esquema simplificado sistema SCR (elaboración propia basado en [119]).....	79
Figura 5-6 Sistema de funcionamiento del catalizador SCR [116]	80
Figura 5-7 Planos de la estructura del escape de los gases en los motores diésel [58]	80
Figura 5-8 Número total de scrubbers instalados y bajo pedido [121]	82
Figura 5-9 Scrubber tipo húmedo cerrado [122]	83
Figura 5-10 Esquema simplificado de un scrubber (elaboración propia basado en [119]).....	84
Figura 5-11 Sistema LBSI a la izquierda [127] y motor BERGEN B36:45 Rolls-Royce a la derecha [128].....	87
Figura 5-12 Sistema DF a la izquierda [129] y motor DE35DF de DAIHATSU a la derecha [128]	87
Figura 5-13 Sistema propulsión a gas en un buque [130]	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 – Control de emisiones de NOx (elaboración propia).....	16
Tabla 2-2 – Niveles de Azufre Estándar y en Zonas de Control de Emisiones (elaboración propia)	16
Tabla 2-3 Ventajas y desventajas de los sistemas combinados (elaboración propia)	35
Tabla 3-1 Comparación turbinas GE LM2500 (elaboración propia)	40
Tabla 3-2 Consumos modo diésel F-104 (elaboración propia)	43
Tabla 3-3 Consumos modo turbina F-104 (elaboración propia)	43
Tabla 4-1 Ventajas y desventajas del biodiesel (elaboración propia)	47
Tabla 4-2 Ventajas y desventajas del gas GNL (elaboración propia)	50
Tabla 4-3 Equivalencia volumen de biogás y cantidad de biomasa (elaboración propia basado en [75]).....	52
Tabla 4-4 Parámetros ambientales anaerobia (elaboración propia)	54
Tabla 4-5 Parámetros operacionales anaerobia (elaboración propia).....	54
Tabla 4-6 Comparación enriquecimiento biogás (Elaboración propia)	57
Tabla 4-7 Distribución de plantas y producción de biometano (elaboración propia)	59
Tabla 4-8 Emisiones de CO ₂ diferentes combustibles (elaboración propia).....	60
Tabla 4-9 Ventajas y desventajas del biometano (elaboración propia).....	63
Tabla 4-10 Eficiencia y recuperación de la desulfuración con UAOD (elaboración propia basado en [95]).....	66
Tabla 4-11 Ventajas y desventajas de desulfuración con ultrasonido (elaboración propia)	68
Tabla 4-12 Ventajas y desventajas de los tipos de scrubber (elaboración propia).....	71
Tabla 4-13 Ventajas y desventajas de un scrubber (elaboración propia)	72
Tabla 5-1 Fabricantes de motores con biodiesel (elaboración propia basado en [106])	74
Tabla 5-2 Precios combustible F-76 y biodiesel (elaboración propia basado en [111])	75
Tabla 5-3 Presupuesto adquisición biodiesel para un buque (elaboración propia basado en [112])	76
Tabla 5-4 Coste de un sistema SCR (elaboración propia basado en [119]).....	81
Tabla 5-5 Emisiones gases efecto invernadero y contaminantes a la atmosfera con SCR (elaboración propia)	81
Tabla 5-6 Coste de un sistema scrubber (elaboración propia basado en [119]).....	83
Tabla 5-7 Emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes a la atmósfera con scrubber (elaboración propia)	85
Tabla 5-8 Parámetros despliegue misión de una F-100 (elaboración propia basado en [124])	85
Tabla 5-9 Emisiones contaminantes biometano (elaboración propia basado en [126]).....	86
Tabla 5-10 Resumen de las propuestas (elaboración propia).....	90

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Desde hace siglos la necesidad de la humanidad por desplazarse más allá de su propio latifundio, se ha traducido en la invención de medios de transporte para sobrevivir y explorar nuevas tierras.

Consiguiendo grandes hazañas como el Descubrimiento de América y la Primera Vuelta al Mundo, se fue evolucionando desde la propulsión a remo y/o vela, la cuál era completamente respetuosa con el medio ambiente por su nula contaminación, hasta la propulsión con combustibles, siendo a día de hoy la herramienta principal para el transporte de mercancías. En la Figura 1-1 [1] se muestra tanto la cantidad de rutas mercantes que existen como la frecuencia que se transitan por estas.

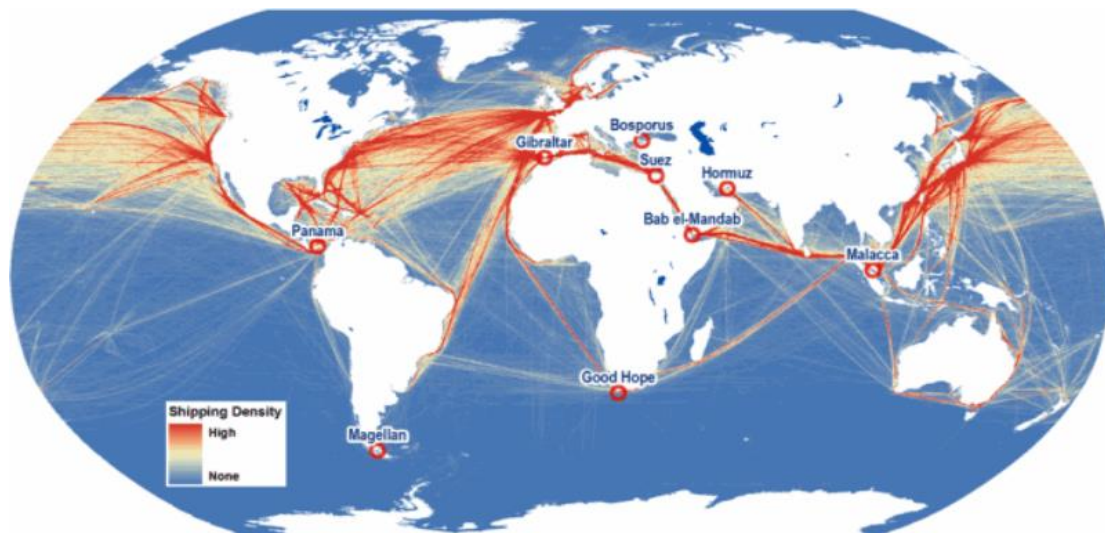


Figura 1-1 – Mapa Mundial Líneas de Transporte Marítimo [1]

Sin embargo, la gran cantidad y variedad de barcos (*104.304 barcos en 2016 según la OMI (Organización Marítima Internacional)*) conllevan consigo una contaminación muy importante. Por lo que cumplir con el convenio MARPOL es de vital importancia, ya que estas normas son de obligatorio cumplimiento para todo buque mercante que navegue por el mar y restringe las zonas de paso en función de las partículas contaminantes que el buque emita y su año de construcción. Consiguiendo de este modo prolongar el tiempo de utilización de los combustibles fósiles sin que se viertan tantas sustancias al mar y dar paso a la innovación de nuevas energías renovables que consigan el objetivo de no contaminar.

De este modo se pretende alcanzar un nuevo modelo energético que cumpla con los límites de contaminación y obtenga suficiente energía para no perder capacidades operativas, tanto en el plano militar como civil, obteniendo así una mayor eficiencia medioambiental.

1.2 Motivación

La contaminación de los combustibles fósiles repercute enormemente en la sociedad actual ya que tiene su efecto directo en la vida diaria de las personas, perjudicando tanto la vida marina y el sector pesquero como la economía de los países que dependan de este trabajo, cabe destacar los siguientes puntos:

➤ Combustibles fósiles:

Se estima que la contaminación por combustibles fósiles lleva asociada consigo 4,5 millones de muertes anuales y que genera pérdidas económicas en torno a 2,9 miles de millones de euros, lo que equivale al 3,3% del PIB mundial. La causa de la mortalidad está relacionada directamente con el riesgo de padecer cáncer de pulmón y asma. Se estima que fallecen 40.000 niños anualmente antes de llegar a los 5 años de edad debido a las micro partículas (PM2.5), dejando a 16 millones de niños con asma desde ya una temprana edad. En España este coste se calcula 23.631 millones de euros anuales, lo que equivale al 1,68% del PIB [2]. La Comisión Europea ha llevado a España al Tribunal de Justicia de la UE (Unión Europea), enfrentándose a sanciones millonarias por no cumplir los niveles de calidad de aire mínimos exigidos.

Si los combustibles actuales no contaminasen tanto, se obtendrían una mayor ventaja tanto en el medioambiente como en la salud, y no existiría la necesidad de regular todas estas emisiones. *“No nos damos cuenta que la contaminación del aire es un asesino invisible”* Según Neelu Tummala, oftalmólogo catedrático de la Universidad de George Washington. [3]

➤ Contaminación Industrial:

Durante el año 2020, los datos de contaminación bajaron un 5%, dato que es comprensible por la pandemia. Esto sería un dato significativo y provocaría un efecto rebote ya que en 2021 se alcanzarían valores incluso superiores al 2020, un incremento de un 4,9 % en 2021. Uno de los principales causantes de este hecho es el incremento de uso del carbón, sin contar con el restablecimiento de la combustión de la gasolina y el diésel, como se muestra en Figura 1-2 [4].

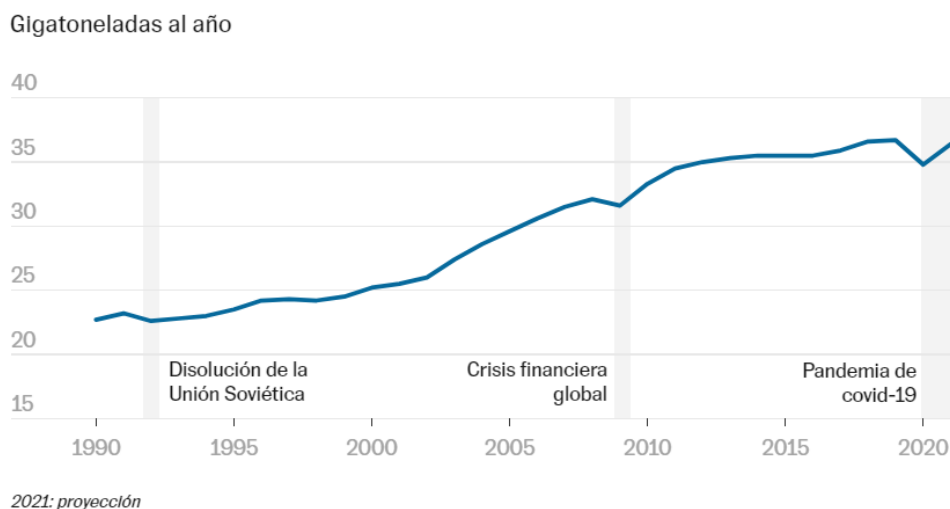


Figura 1-2 – Emisiones Globales de CO₂ [4]

➤ Transporte marítimo y aviación:

La aeronáutica y la navegación marítima han ayudado a incrementar las distancias de comercialización y a intensificar su frecuencia, aparte de crear millones de empleos. Entre 1955 y el 2050 se espera que el transporte de pasajeros crezca un 70% y el transporte de mercancías en un 100% [5]. Sin embargo esto lleva consigo un gran aumento de las emisiones, representando un 22% en la aeronáutica y un 17% en el plano marítimo con respecto a las emisiones de CO₂ en 2050. Lo que llevaría a estar claramente en desventaja para cumplir los objetivos del European Green Deal [6] que exige que se reduzcan un 90% las emisiones contaminantes antes del 2050. A partir del año 2018, se exige una reducción de velocidad en torno al 20% en las entradas y salidas de puertos europeos.

No solo existe la contaminación mediante combustibles fósiles, sino también existe la combustión acústica y el impacto visual que tienen cuando se puede ver más de un carguero a la vez.

1.3 Justificación

Este Trabajo Fin de Grado (TFG) nace a raíz de la necesidad de reducir la emisión de los contaminantes en la navegación marítima. Sabiendo que la navegación tiene una importancia enorme actualmente, no es viable una reducción de la actividad pues se estarían perdiendo capacidades. La idea reside en encontrar un equilibrio entre el transporte y su actividad junto con la reducción de la contaminación.

Se utilizará como ejemplo la flota de la Armada Española donde ninguna fragata tiene ningún proceso de reducción de contaminantes en la exhaustación de los gases producidos, debido a que no se limitan las emisiones de los buques de guerra para que puedan operar a pleno rendimiento y no encuentren limitaciones a sus capacidades. Respecto a este punto, ya se está desarrollando una solución para que se puedan cumplir los mismos objetivos pero reduciendo en gran medida su contaminación [7]. Por lo que la consecución de este objetivo sería un gran reclamo para el resto de Armadas y un modelo a seguir. Por ello surge la importancia de la investigación en este apartado ambiental y tecnológico, posicionando a España a la vanguardia de este tema.

En consecuencia, el desarrollo de sistemas de propulsión con combustibles alternativos está cogiendo cada vez más peso, como puede ser el biogás. Pues de este modo se conseguiría el objetivo de encontrar el equilibrio entre no reducir la actividad y la contaminación 0 por estos medios, haciendo del mundo un lugar sostenible para futuras generaciones. Por ello, el invertir en líneas de investigación que reduzcan la contaminación sin tener que reducir las capacidades de transporte, ya sea marítima, aérea o por tierra, haciendo de esto un medio eficaz y sostenible en la línea del tiempo. Pues no solo es importante la potencia de un medio sino lo que puede perdurar sin contaminar en su ruta ya que cada vez está afectando más al cambio climático y al efecto invernadero.

1.4 Objetivos

Lo que se pretende con el presente trabajo es la consecución de los siguientes puntos:

- ✓ Analizar los sistemas de propulsión de las fragatas F-100 de la Armada Española, así como su proceso de exhaustación de gases.
- ✓ Proponer alternativas a estos sistemas de propulsión y para el gas natural, que realmente cumplan de manera efectiva las restricciones técnicas, económicas y medioambientales del convenio MARPOL.
- ✓ Proponer un sistema de tratamiento de gases de escape de las plantas propulsoras.

- ✓ Realizar un balance energético que demuestre las ventajas que se obtendrían mediante la implantación del biogás u otro sistema como vertiente a desarrollar.
- ✓ Sintetizar de manera óptima todo lo expuesto en el proyecto además de dejar cabida a nuevas líneas de trabajo futuras en este plano ambiental.

1.5 Estructura

A modo de seguir el trabajo de la forma más sencilla y representativa posible, se muestra en la siguiente Figura 1-3 los puntos más importantes a tener en cuenta.

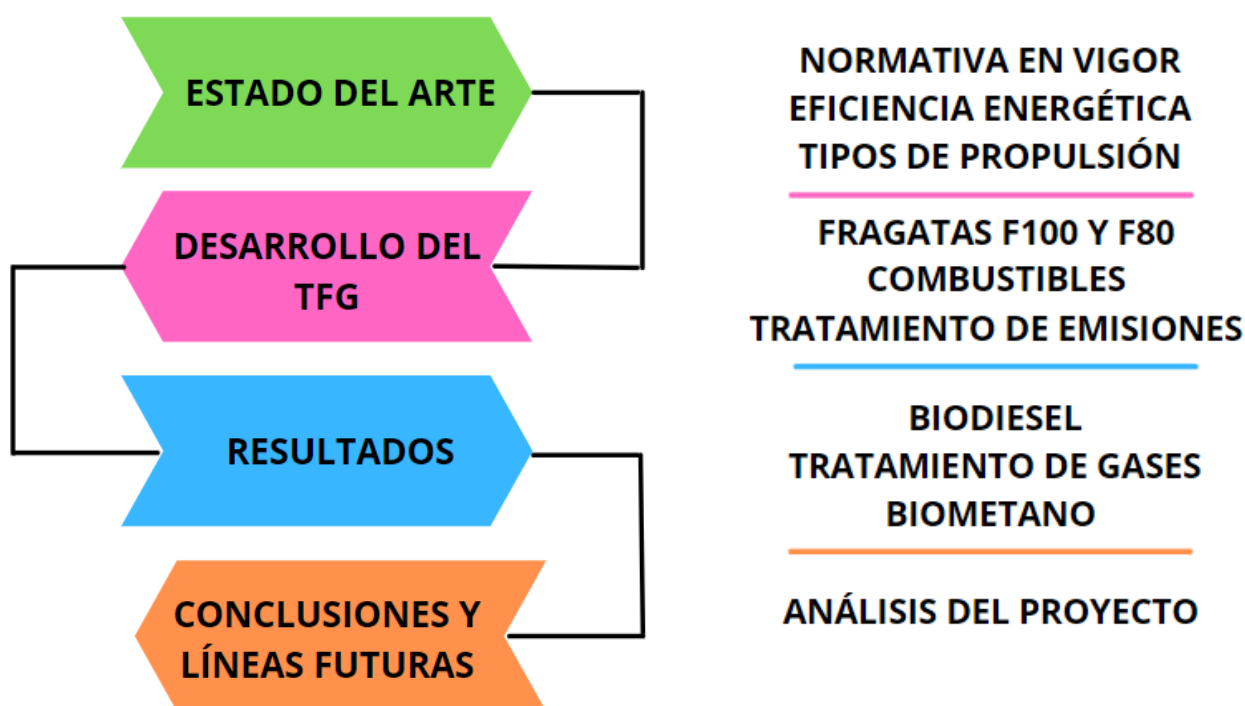


Figura 1-3 – Estructura de la Memoria (elaboración propia)

Como se pretende dar a entender en la Figura 1-3, en el estado del arte se hará un análisis de la normativa que todos los buques han de cumplir de acuerdo con el convenio MARPOL, junto con sus anexos que más repercuten en este TFG, se abordará el concepto de Eficiencia Energética para un mejor aprovechamiento de los recursos que tienen los buques de guerra españoles y se explicarán conceptualmente los sistemas de propulsión más empleados en la actualidad, así como su evolución a lo largo de la historia.

Así también, como cuerpo del proyecto, se realizará una explicación de la planta propulsora de una F-100 española, además de una investigación de los posibles combustibles alternativos que de manera real se pueden llevar a cabo, haciendo especial hincapié en el biogás y el tratamiento de gases para conseguir la mínima contaminación posible.

Posteriormente en el apartado de resultados, se explicarán las propuestas más eficientes en términos económicos, de consumo y emisiones, así como de su tiempo estimado de implementación.

Finalmente, se sintetizará el trabajo exponiendo las conclusiones que se sacan del mismo, así como las posibles líneas de desarrollo futuras.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Normativa en vigor

2.1.1 *Análisis General del Convenio MARPOL*

En 1973, la OMI adoptó un convenio para regular la contaminación de los buques, España entraría en el convenio a partir de mayo de 1979. Conocida actualmente como MARPOL. Posteriormente modificado en los años 1978 y 1997, entrando en vigor en el año 2005. A partir de entonces, se irán haciendo enmiendas que modifiquen el convenio pero en una menor medida, la última enmienda se hizo en 2019 [8]. Este convenio no se aplica a buques de guerra ni a unidades que sean propiedad del Estado que estén prestando servicios gubernamentales. Sin embargo, el convenio exhorta en la adopción de medidas oportunas dentro de lo posible a adoptar medidas sin que perjudique la capacidad operativa de estas unidades.

Este convenio aborda los hidrocarburos, sustancias nocivas líquidas a granel, sustancias dañinas por vía marítima, aguas negras, basura y por último la contaminación atmosférica de los propios buques. Hoy en día, el convenio posee 6 anexos técnicos con proyección a anexos futuros del MARPOL 73/78. Estos están destinados a prevenir la propagación de organismos acuáticos no deseados que pudieran existir en el agua de lastre y prohibir el uso de pinturas anti-incrustantes tóxicas. Es posible que el CPMM (Comité de Protección del Medio Marino) proponga estos como futuros anexos de convenios independientes.

En la Figura 2-1 se puede ver la importancia del anexo I y sobre todo del anexo VI para este TFG en cuestión. Se abordará por encima el resto de anexos. Son explicados a continuación:



Figura 2-1 Anexos MARPOL (elaboración propia)

➤ Anexo I: Prevención de la Contaminación de Hidrocarburos.

Son moléculas compuestas por combinaciones de átomos de carbono e hidrógeno en su gran porcentaje. Son considerados hidrocarburos el petróleo crudo, fueloil, aceite diésel y aceite lubricante.

Una de las principales causas de la contaminación por hidrocarburos es el transporte marítimo. El derrame de estas sustancias al mar implica la dificultad de interacción de la fauna marina y la flora para proceder a su supervivencia, afectando en gran medida a cetáceos, focas, nutrias, cormoranes y millones de especies de peces. Las aves quedan impregnadas de petróleo, por lo que su plumaje pierde capacidad térmica y entran en hipotermia lo que resulta en muerte de estas especies. Esto tiene su consecución en la población y economías locales, pues afecta directamente a estos. Según cifras obtenidas por la OMI, los cargueros llevan consigo 2.400 millones de partículas de petróleo crudo y derivados. Entre 1970 y 2008, se han vertido unos 5 millones de derivados, por lo que se puede observar que gracias a la instauración de este convenio se ha mejorado exponencialmente a preservación de la vida marina.

Estas medidas han asegurado que los cargueros y petroleros construidos recientemente, operan de forma segura para reducir la cantidad de contaminación incluso en caso de accidente.

El nombre del título puede llevar a confusión, no todo el vertido de sustancias está prohibido. Existen una serie de excepciones en las que el vertido está permitido:

- 1) La cantidad total de hidrocarburo que puede descargar en un viaje de lastre no puede exceder 1/15.000 de la capacidad total de carga del buque.
- 2) Esta cantidad no puede exceder los 60L por milla náutica.
- 3) Se requiere un registro de control de hidrocarburos tanto residual como de lastre.

➤ Anexo II: Control de la contaminación de sustancias nocivas a granel.

Existe una lista en la que aparecen las 250 sustancias más perjudiciales (Ácido cianhídrico, éteres, formaldehído...) para la biodegradación y la salud humana y cuáles de estas están reguladas dependiendo de la instalación. Se prohíbe la descarga de residuos a menos de 12 millas de costa.

➤ Anexo III: Prevención de la contaminación por sustancias perjudiciales en bultos.

Prescripciones para el empaquetado y documentación necesaria, estiba y notificación de la mercancía.

➤ Anexo IV: Prevención de la contaminación de aguas residuales.

La descarga directa está prohibida y se necesitará de un tratamiento regulado para ello, desmenuzándolas, triturándolas y desinfectarlas.

➤ Anexo V: Prevención de la contaminación por basuras de los buques.

Trata de las distintas basuras en relaciones a la distancia del buque a costa para el vertido de plásticos.

➤ Anexo VI: Prevención de la contaminación atmosférica por buques.

En 1997 fue cuando se incluyó este anexo, pero no sería hasta 2005 cuando entró en vigor. Este trata de reducir las emisiones del aire procedentes de los buques (SOx, NOx, SAO (Sustancias que consumen la capa de ozono), COV (Compuestos Orgánicos Volátiles) y PM (Material Particulado), y se prohíben las emisiones deliberadas de sustancias que agotan la capa de ozono.

2.1.2 Análisis específico del Anexo VI del convenio MARPOL

Dada la importancia de este Anexo VI para la consecución de los objetivos de este trabajo, se realiza un estudio más detallado de manera legislativa. A comienzos de 1970, los fenómenos de la lluvia ácida en las ciudades industrializadas motivaron a la realización de la Conferencia de Estocolmo sobre el Medio Ambiente [9]. Organizada por las Naciones Unidas. Se asentaron las bases para la mejora de las condiciones medioambientales. Posteriormente, surgiría el Protocolo de Montreal, para hacer frente a las nuevas amenazas no analizadas en Estocolmo, como es el deterioro de la capa de ozono. Determinándose los daños que producían estas sustancias. Comenzando desde entonces con la idea de “desarrollo sostenible”. La lucha continúa con la firma del Convenio Marco de Cambio Climático de las Naciones Unidas (CMNUCC) en 1992. Los países más industrializados se vieron sumergidos en esta problemática teniendo que regular las emisiones viendo sus efectos adversos al medio y a la humanidad [10]. A partir de entonces, surgirían asambleas anuales llamadas Conferencias de las Partes (CP). Se muestran en la siguiente Figura 2-2, las conferencias más importantes desde su inicio hasta la actualidad. En el transcurso de estas, se reafirma que el cambio climático es problema de toda la humanidad y su remedio ha de ser progresivo y eficaz.

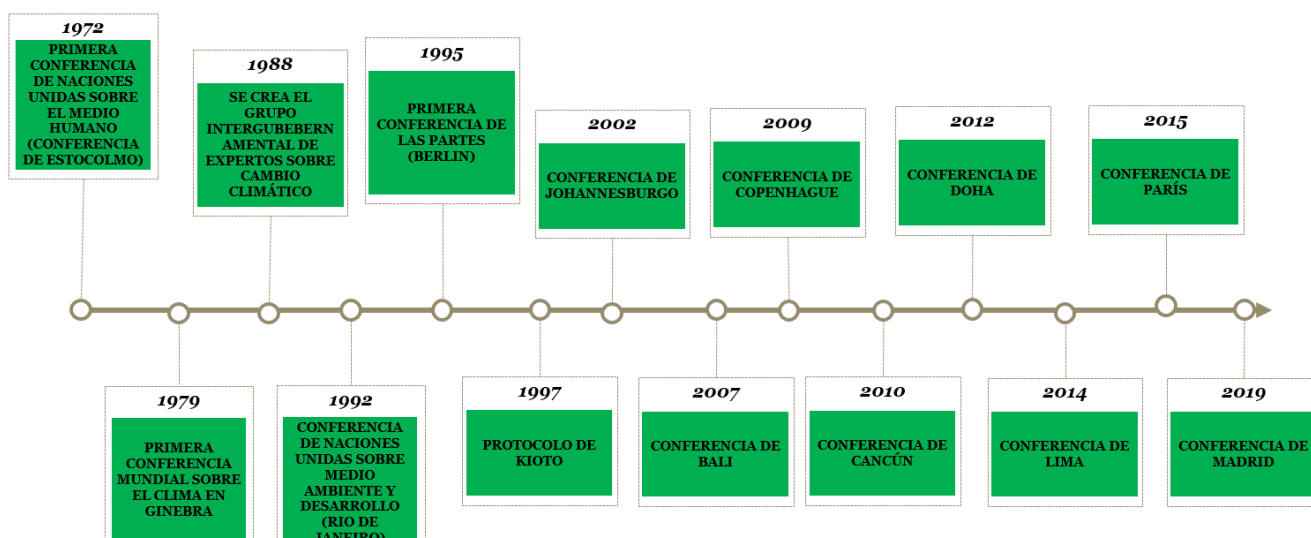


Figura 2-2 Cumbres Naciones Unidas sobre Cambio Climático (elaboración propia)

➤ **Los países que están de acuerdo con el anexo VI son:**

- | | | | |
|----------------------|------------|---------------------|------------------|
| ➤ Antigua y Barbuda | - Francia | - Malta | -Serbia |
| ➤ Australia | - Alemania | - Islas Marshall | - Sierra Leona |
| ➤ Bahamas | - Ghana | - Mongolia | - Singapur |
| ➤ Bangladesh | - Grecia | - Marruecos | - Eslovenia |
| ➤ Barbados | - India | - Países Bajos | - España |
| ➤ Bélgica | - Irán | - Niue | - Suecia |
| ➤ Belice | - Irlanda | - Noruega | - Tayikistán |
| ➤ República de Benín | - Italia | - Trinidad y Tobago | - Brasil |
| ➤ República de Palau | - Jamaica | - Panamá | - Túnez |
| ➤ Bulgaria | - Japón | - Perú | - Tuvalu |
| ➤ Canadá | - Kenia | - Polonia | - Ucrania |
| ➤ Chile | - Kiribati | - Portugal | - Reino Unido |
| ➤ China | - Kuwait | - Corea | - Estados Unidos |
| ➤ Islas Cook | - Letonia | - Rumanía | - Vanuatu |
| ➤ Croacia | - Liberia | - San Cristóbal | - Hong Kong |
| ➤ Dinamarca | - Lituania | - San Vicente | - Estonia |
| ➤ Luxemburgo | - Samoa | - Finlandia | - Malaysia |
| ➤ Arabia Saudí | | | |

➤ **Principales sustancias perjudiciales de acuerdo con el anexo VI**

De acuerdo con el anexo VI del convenio MARPOL, existen sustancias que poseen un gran poder perjudicial para el medio ambiente y son las que deben de ser reguladas de forma estrictas.

✓ Óxidos de Nitrógeno:

Existen dos sustancias en este apartado que son las toxicológicas: monóxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂), que afectan a los pulmones. Además, el NO₂ reacciona con ozono dando como resultado ácido nítrico (NHO₃), siendo uno de los factores para provocar la lluvia ácida. El NO, reacciona con el aire al ser expulsado por los gases de escape, originando el NO₂, provocando así una mayor cantidad de este compuesto [11].

Esta regulación depende del año de construcción del barco, tiene diferentes niveles de emisión en función del régimen de revoluciones del motor, está puesto de forma sintetizada en la siguiente Tabla 2-1.

Nivel 1	Buques construidos hasta el 1 de enero de 2011
---------	--

17 g/kWh $45 \times n^{-0,2}$ g/kWh 9,8 g/kWh	Si n es inferior a 130 rpm Si n esta entre 130 y 2000 rpm Si n es mayor o igual a 2000 rpm
Nivel 2	Buques construidos a partir del 1 de enero de 2011
14,4 g/kWh $45 \times n^{-0,23}$ g/kWh 7,7 g/kWh	Si n es inferior a 130 rpm Si n esta entre 130 y 2000 rpm Si n es mayor o igual a 2000 rpm
Nivel 3	Buques construidos a partir del 1 de enero de 2016
3,4 g/kWh $9 \times n^{-0,2}$ g/kWh 2,0 g/kWh	Si n es inferior a 130 rpm Si n esta entre 130 y 2000 rpm Si n es mayor o igual a 2000 rpm

Tabla 2-1 – Control de emisiones de NOx (elaboración propia)

En la tabla, n son las revoluciones del motor. Señalar que el nivel 3 es solo para buques construidos a partir de ese año y naveguen dentro de las ECA (Emission Control Area).

➤ Óxidos de azufre:

Este componente también ayuda a la formación de la lluvia ácida, a aparte de que afectan a la superficie dañando la vegetación [12].

Esta sustancia es limitada según la siguiente Tabla 2-2.

Nivel de azufre	Valores de referencia
4,5% en masa	Antes del 1 de enero de 2012
3,5% en masa	Del 1 de enero de 2012 en adelante
0,5% en masa	Del 1 de enero de 2020 en adelante
Nivel de azufre en ZCE	Valores de referencia
1,5% en masa	Antes del 1 de enero de 2010
1,0% en masa	Del 1 de enero de 2010 en adelante
0,1% en masa	Del 1 de enero de 2015 en adelante

Tabla 2-2 – Niveles de Azufre Estándar y en Zonas de Control de Emisiones (elaboración propia)

A partir del 1 enero del 2020, el nivel de azufre del combustible se redujo hasta un 0,5%. Fuera de las zonas de control designadas, en estas solo se permite un 0,1%. Esto supondrá una reducción de 8,5 millones de toneladas de SO_x, lo que se traduce en una reducción del 77% de las emisiones de los buques. Esta medida supone una intensa labor por parte de la OMI para imponer el cumplimiento de la emisión de los compuestos del azufre. Donde se espera con gran optimismo las ventajas que supone esta norma, como, por ejemplo: disminución de asma, cáncer de pulmón y enfermedades pulmonares. Se pueden emplear aditivos para mejorar las propiedades del combustible (lubricidad). No se recomienda la mezcla de diferentes combustibles de acuerdo a las normas ISO 8217 [13] e ISO/PAS 23263:2019 [14]. Los buques pueden cumplir esta norma empleando métodos equivalentes, tales como: limpieza de gases de escape, scrubbers... Estos métodos han de ser aprobados por el país abanderado del propio buque. Permitiendo así, emplear combustibles pesados en su funcionamiento siempre y cuando se tenga a bordo este proceso de tratamiento de gases.

Existen zonas de control de emisiones de SO_x en la que es obligatorio adoptar medidas especiales:

- Clara delimitación de la zona.
- Evaluación que demuestre que no supera los límites permitidos.
- Información meteorológica de la zona a controlar.

Estas zonas reguladas denominadas zonas ECA (Emission Control Area) y futuras zonas ECA [15], se muestran en la Figura 2-3.

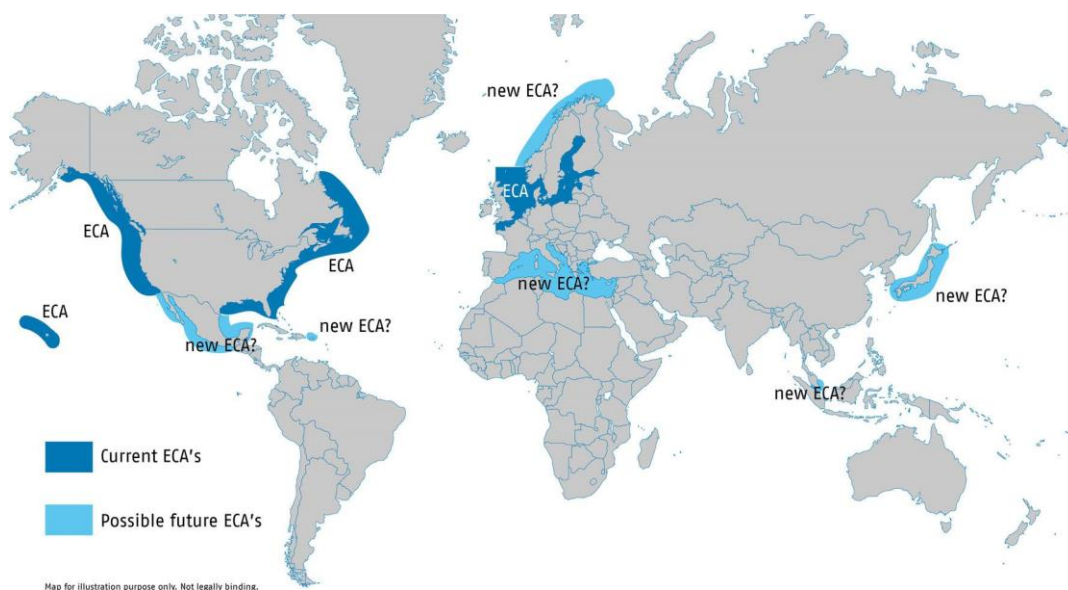


Figura 2-3 – Zonas ECA y Futuras ECA [15]

Estas medidas pueden no ser obligatorias cuando exista riesgo de la plataforma y/o la dotación.

➤ **Compuestos Orgánicos Volátiles (COV):**

De acuerdo con el Ministerio para la Transición Ecológica, son hidrocarburos en estado gaseoso a temperatura ambiente [16]. Se pueden clasificar en:

- Sustancias peligrosas para la salud (benceno)
- Compuestos clase A, gran poder perjudicial para el medioambiente (acetaldehído)

- Compuestos clase B, son más leves que la clase A (acetona)

Los petroleros que transporten petróleo crudo deberán de tener un plan para los COV para reducir sus emisiones en la carga, descarga y navegación. Esta misma regla existe para el resto de mercantes si poseen alguna sustancia de este apartado.

➤ Material Particulado (PM):

La OMI no especifica límites de emisión de este compuesto, se regula en función de la calidad del combustible y sigue la misma normativa que los SO_x (regla 14). Conocido como contaminación a través de partículas, consiste en una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire (hollín, polvo, suciedad, etc.). Pueden ser de un tamaño considerable y oscuro para que pueda ser visto a simple vista o tan pequeñas que solo pueden ser detectadas a través de un microscopio. Pueden estar conformados por cientos de compuestos químicos que dependen de su fuente (chimeneas, tubos de escape, incendios, obras). Estos compuestos pueden ser fácilmente inhalados y provocan fuertes problemas de salud, ya que pueden alcanzar los pulmones de una manera sencilla. Los principales compuestos son:

- PM₁₀: Partículas con un diámetro de 10 micrómetros
- PM_{2,5}: Partículas finas con un diámetro de 2,5 micrómetros

En la siguiente Figura 2-4 se ve representado el tamaño de las partículas comparadas con el cabello humano [17].



Figura 2-4 Comparación tamaño partículas PM [17]

➤ SAO (Sustancias que consumen la capa de ozono):

Está regulado de acuerdo con el Protocolo de Montreal (1987), que fue actualizado varias veces hasta su última actualización en 2019 en Madrid, que regula los 96 productos químicos a través de la Unión Europea por el reglamento (CE) n°1005/2009 [18]. Si todos los países del acuerdo cumplen los objetivos que marca el tratado, la capa de ozono se puede recuperar para el año 2050.

Existen 6 compuestos principales que destruyen la capa de ozono: clorofluorocarbonos (CFC), hidroclorofluorocarbonos, halones, tetracloruro de carbono, hidrobromofluorocarbonos y bromuro de metilo. De todos estos, los más peligrosos son los CFC y los halones, ya que son necesarios para medios

contraincendios en los buques. A partir de 2020 se prohibió el vertido de todas estas sustancias a excepción de los hidroclorofluorocarbonos [19].

Se establecen también límites máximos de halones y clorofluorocarbonos (CFC), contribuyendo de forma negativa a la capa de ozono. Se encuentran regulados en los países desarrollados de acuerdo con las enmiendas de Copenhague [20].

2.1.3 Futuras enmiendas al convenio MARPOL

A continuación, se muestran las futuras enmiendas que entrarán en vigor el año 2022 y en los próximos años:

- ✓ 1 de abril de 2022, enmiendas al anexo VI sobre el contenido de azufre:

Se modifican definiciones en el contenido de azufre medidos en % m/m, definición de combustible de bajo punto de inflamación es aquel que es inferior a los combustibles del párrafo 2.1.1 de la regla II de los combustibles que cumplen con los requisitos y definición de muestra en uso (la cual es de uso en un buque) y muestra de a bordo (es la destinada al empleo en ese buque). Enmiendas al apéndice I del IAPP (Certificado Internacional de Prevención de la Contaminación Atmosférica). Actualizándolo para añadir referencias a los puntos de muestreo y destacar una exención para el combustible de baja inflamación. Se actualiza el apéndice VI sobre la verificación del combustible según las muestras para cubrir las enmiendas sobre las muestras de combustible en uso y a bordo de un buque.

- ✓ 1 de junio de 2022.

De acuerdo con el MEPC (Comité de Protección del Medio Marino) 75, enmiendas sobre la gestión del agua de lastre y sedimentos de los buques propuesta en 2004, relacionado con la gestión de agua de lastre y su modelo de Certificado Internacional sobre su propia gestión. Adoptados por MSC (Modelo de Seguridad y Privacidad) 102, enmiendas al Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas, relacionadas con la segregación relativas a los alcoholatos, con las sustancias orgánicas líquidas, clasificación y transporte del carbón en relación con los sucesos del carbón vegetal, clasificación de buques cisternas de las Naciones Unidas y disposiciones a las etiquetas.

- ✓ 1 de noviembre de 2022

Disposición del MEPC 76 de entrada en vigor del anexo VI revisado incluyendo medidas del carbono, calculando los buques su eficiencia energética indicando la intensidad de carbono operacional anual. Enmiendas al anexo I junto con la incorporación de la regla 43^a, para la prohibición de emplear y transportar fueloil pesado en aguas del Ártico a partir del 1 de julio de 2024. Quedan exentos los buques de guerra y pertenecientes al Estado del país. También quedarían exentos los destinados a derrames de hidrocarburos. Estos nuevos buques que sean construidos con tanques que cumplan con lo exigido en este nuevo apartado, deberán estar cumpliendo este punto a partir del 1 de julio de 2029. Enmiendas a los anexos I y IV sobre la exención de las gabarras en las prescripciones sobre reconocimiento y certificación por un período no superior a cinco años siempre que la gabarra no haya sido utilizada para verificar el cumplimiento de este apartado.

- ✓ 1 de enero de 2023

Medidas de intensidad del carbono.

El SEEMP (Plan de Gestión de Eficiencia Energética del Buque) incluirá cómo calcular dato de eficiencia de un buque anual. Al finalizar cada año, todo buque de arqueo bruto superior a 5000 toneladas, se calculará su eficiencia anual desde el 1 de enero hasta el 31 de diciembre. La Administración autorizada documentará el valor anual obtenido con el fin de determinar la clasificación

de la intensidad (A, B, C, D o E) siendo niveles de rendimiento muy superior, superior, moderado, inferior o muy inferior.

Los buques que tengan clasificación D tres años consecutivos o un año solo con E, se elaborará un plan de medidas correctivas para alcanzar el valor energético óptimo. Convenio de formación de acuerdo con MSC 103. Enmiendas sobre normas de formación, titulación y guardia para la gente de mar, incorporando la definición de “alta tensión” en la regla I/1. Se incluirá la categoría de oficial electrotécnico de nivel operacional como parte de las enmiendas de Manila de 2010. Programas mejorados de inspecciones sobre reconocimientos graneleros y petroleros de acuerdo con la medición de espesores en el reconocimiento de renovación de petroleros de doble casco [21].

2.2 Eficiencia Energética

La eficiencia energética (EE) tiene como objetivo emplear la menor energía posible para conseguir los mismos objetivos. Un uso eficiente de la energía se traduce en una optimización tanto de los recursos energéticos como de su producción, contribuyendo positivamente a la reducción de la contaminación global.

En la actualidad, los buques de guerra son construidos para que sean multipropósito. Esto hace que su abanico de capacidades sea mucho mayor que un buque que tenga un solo propósito, por ejemplo: BAA (Buque de Asalto Anfíbio) “Galicia” de la Armada Española. Estos buques necesitan de una gran dependencia energética al tener que suministrar a varios equipos. La demanda creciente de los recursos energéticos y el poco desarrollo de las energías renovables, van a conllevar al agotamiento de los combustibles fósiles. Es por ello, que el campo de la EE está cogiendo cada vez más importancia [22]. La transformación de los combustibles fósiles a los combustibles renovables, está considerado como uno de los mayores retos del siglo XXI. Este proceso afecta tanto a los campos tecnológicos e innovación como a la concienciación de la humanidad.

El alto consumo de la energía no renovable se ha traducido en que las empresas modernas potencien el desarrollo de la EE. Llegando al caso de establecer el día 5 de marzo como el Día Mundial de la Eficiencia Energética, para la reflexión del ser humano sobre la contaminación.

Existen factores que influyen en la EE, estos son: factores económicos, tecnológicos y sociales. Los factores dependen de los siguientes parámetros, véase Figura 2-5.

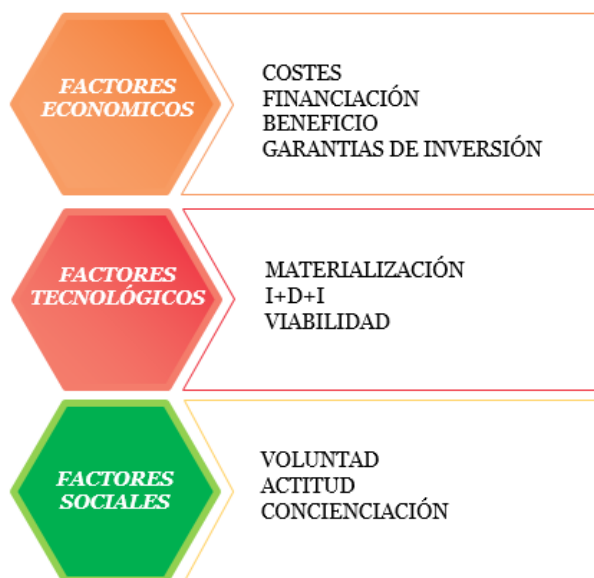


Figura 2-5 Factores de la EE (elaboración propia)

2.2.1 *La Unión Europea (UE)*

La Unión Europea ha conseguido una política energética comunitaria estableciendo las líneas generales de forma que se garantice una energía sostenible, segura y competitiva. Firmándose en 2007 “Una política energética para Europa” [23]. Este comunicado no se materializaría hasta el 2020, fundamentada en el desarrollo sostenible estableciendo objetivos cuantificables:

- Reducción de un 32,5 % de los gases contaminantes comparados con los niveles de 1990.
- Incremento de un 32,5 % de las energías renovables.
- Aumento del 32,5 % de la EE.

Destacar que estos objetivos son para 2030 y en 2023 puede haber una revisión si los objetivos no se están cumpliendo.

Con el simple hecho de mejorar la EE, se contribuiría a mejorar todos los objetivos previos. Disminuyendo la dependencia energética y las emisiones de todo tipo. La UE ha regulado iniciativas para mejorar este fin:

- Se instauro un marco para los requisitos de diseño ecológico aplicados a la energía (Directiva 2009/125/CE [24]).
- Indicación del consumo de energía y otros recursos que tengan relación con la energía por etiquetado e información estandarizada (Directiva 2010/30/UE) [25]).
- Eficiencia final del uso de la energía y sus servicios energéticos (Directiva 2006/32/CE [26]).

Ya en 2012, la UE es concedora de que los objetivos que se pretendían alcanzar en 2020, no van a ser materializados. Por lo que surge la Directiva 2012/27/UE, donde se pretende agilizar la EE a nivel mundial para conseguir el objetivo. Deroa las directivas al fomento de la cogeneración y eficiencia del uso final de la energía. Cada país miembro marco sus objetivos para alcanzar el plan establecido. Donde España establece el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030 [27].

2.2.2 *Interés para la Armada*

Las FAS (Fuerzas Armadas) está integrando el concepto de reducción de emisiones, pero siempre teniendo prioridad la operatividad de forma ineludible. Existen organismos que están dedicado a la consecución de este objetivo, como es el ejemplo de la Subdirección General de Planificación y Medio Ambiente. Este organismo desarrolla la política del Ministerio de Defensa y dirige y supervisa el Plan de Ahorro y Eficiencia Energética (PAEE) [28].

Los objetivos son la concienciación del personal militar, promover el ahorro energético, la protección y mantenimiento del medioambiente y el fomento de energías renovables. Un consumo menor de la energía, se traduce en una menor emisión de los agentes contaminantes y reducción del coste de la operación.

A continuación, se explica la obtención de la EE de un buque y los parámetros que rigen este concepto.

- Índice de Eficiencia Energética de Diseño (EEDI)

Es un dato que permite conocer información acerca de la EE de un buque en concreto, dependiendo de su categoría y tamaño. Se descartan aquellos que no superen las 400 toneladas de arque bruto [29]. Mediante este cálculo, se obtiene la cantidad de CO₂ emitida a la atmosfera por tonelada de carga, siendo

necesario que cumpla unos mínimos. Estos mínimos están regulados de acuerdo con el umbral establecido por la OMI en función del promedio de CO₂ de la flota mundial entre 1995 y 2004. Es obligatorio llevar un expediente a bordo con la información necesaria para su cálculo, esto será comprobado por personal competente de la OMI. Cuanto menor sea el EEDI, mayor será el EE.

- Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del buque (SEEMP)

Es un plan específico para cada buque optimizando su EE, reduciendo su consumo de combustible, lo que se traduce en ahorro de combustible y reducción de emisiones. Aquí se reflejarían las circunstancias particulares del propio buque. Para implantar dicho plan se establecen unas cinco fases para mejorar la EE: planificación, implantación, vigilancia, autoevaluación y mejora. La certificación del SEEMP conlleva a la concesión del Certificado Internacional de Eficiencia Energética (IEE) completando el Certificado Internacional de Previsión de la Contaminación Atmosférica (IAPP) junto con la norma ISO 14001 [29].

- Indicador Operacional de la Eficiencia Energética (EEOI)

Herramienta que ayuda a mejorar en la EE de un buque, es considerado un dato óptimo para seguir con facilidad el rendimiento del buque. Existe el problema de que no hay dos buques iguales que se dediquen a lo mismo. Por lo que es un dato óptimo para observar la propia evolución de un barco al que se le está aplicando este parámetro.

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \times C_{Fj}}{m_{carga} \times D}$$

- j la clase de combustible
- FC_j la masa de combustible j consumido
- C_{Fj} factor de conversión entre el combustible y la masa de CO₂ según el combustible.
- M_{carga} carga transportada en toneladas, número de pasajeros o arqueado bruto.
- D la distancia del viaje.

En un buque de guerra, tanto la carga como la dotación, se consideran valores constantes. Se calcula una emisión de CO₂ de 3,21 gramos por mililitro de diésel F-76. El valor medio del EEOI para buques de guerra es de 54, considerando un consumo medio de 106 L por milla náutica. Las emisiones de CO₂ para un despliegue operativo en el Mediterráneo fueron de 10.000 toneladas, emitiendo 90 toneladas en un día de navegación y 12 toneladas en un día en puerto. En un buque de guerra existen situaciones operativas que requieren de una mayor demanda, aumentando el EEOI hasta 75. Estos valores dependen también de las distancias recorridas y en las zonas que se encuentre el buque [30].

Como se puede ver es un dato representativo el cuál se puede reducir si también disminuyen las emisiones de CO₂. Para su cálculo, es necesario una recolección de datos durante el tránsito del consumo de combustible y la distancia recorrida.

2.3 Tipos de propulsión

2.3.1 Reseña histórica

La Tierra está cubierta por un 70% de agua, por lo que no es extraño que el hombre empezase a ingeniar formas para poder navegar a través de este fluido y expandir sus dominios. Empezando con

simples troncos a través de ríos calmados y en aguas someras, añadiendo más tarde el motor infinito de la vela a través del viento, surgiendo así la invención del barco a través de los griegos, romanos y egipcios, pero se desconoce quién lo hizo realmente, ya que pudo ser la misma idea, pero en diferentes sitios. Los registros recogen que comenzó en Mesopotamia (4000 años a. C.) [31] sin embargo hasta la Edad Antigua se conoce realmente que se empleaban con frecuencia. En la Figura 2-6 se muestra el primer dibujo/plano de un barco.



Figura 2-6 – Primera Representación de un Buque [31]

El desarrollo de estas pequeñas naves fue lento, pero cuando los recursos para sobrevivir escaseaban fue necesaria la exploración a otras tierras y continentes para conseguir la supervivencia. A medida que se iban explorando los nuevos mares y observando lo arriesgado que podría llegar a ser, se agudizaban las habilidades astronómicas y náuticas para llegar a navegar de manera segura y en cualquier momento. Se llegaría a construir carabelas de una magnitud impresionante, consiguiendo obras increíbles de ingeniería. En este apartado España se puede sentir orgullosa y se puede entender porque se hace tanto hincapié en este punto de la historia, ya que se conseguiría el descubrimiento de América y la primera vuelta al mundo, siendo la principal potencia en el mundo por aquel entonces [32]. Posteriormente, este medio quedará para el recuerdo y ver la valentía que tenían aquellos marineros y las increíbles batallas que existieron embarcados en este tipo de navío. En la Figura 2-7, se muestra el “Santísima Trinidad” como uno de los navíos más enigmáticos del siglo XVIII.



Figura 2-7 – Carabela Santísima Trinidad [32]

Ya en 1807, Robert Fulton diseña el primer barco de vapor de la historia, el “Clermont”, que se propulsaba a través de una rueda de paletas por medio de una máquina de vapor [33]. En la Figura 2-8 se muestra el “Clermont”.



Figura 2-8 – Primer Barco Propulsado “Clermont” [33]

Avanzando ya hasta el siglo XX, surgen las nuevas formas de propulsión como es la propulsión a vapor, la contaminación que se producía por aquel entonces no se tenía en cuenta ya que no existía una concienciación del cambio climático, aunque el carbón emite más CO₂ que cualquier combustible fósil. El siglo XX fue en donde se potenciaron las propulsiones a través de combustibles fósiles consiguiendo grandes autonomías y velocidades. Hoy en día existe también la propulsión nuclear, la turbina de gas y el motor eléctrico. Actualmente, se está buscando la alternativa al diésel como propulsor para reducir mucho más la contaminación ya que aún no es suficiente. Esta línea de investigación se ha convertido en una de las más desarrolladas ya que el beneficio que generaría la propulsión de cualquier medio a través de una energía renovable y fiable, sería enorme [34].

2.3.2 Propulsión simple actual

Actualmente existen multitud de plantas propulsoras en los buques, hay una gran variedad dependiendo del propósito al que está destinada la plataforma [35]. Cabe destacar que no todas son iguales de eficientes y las más utilizadas con las que más eficacia económica y náutica se puede conseguir. Todas ellas comparten elementos en común: motor propulsor, medios de transmisión y hélice [36]. Tal y como se puede ver en la Figura 2-9.

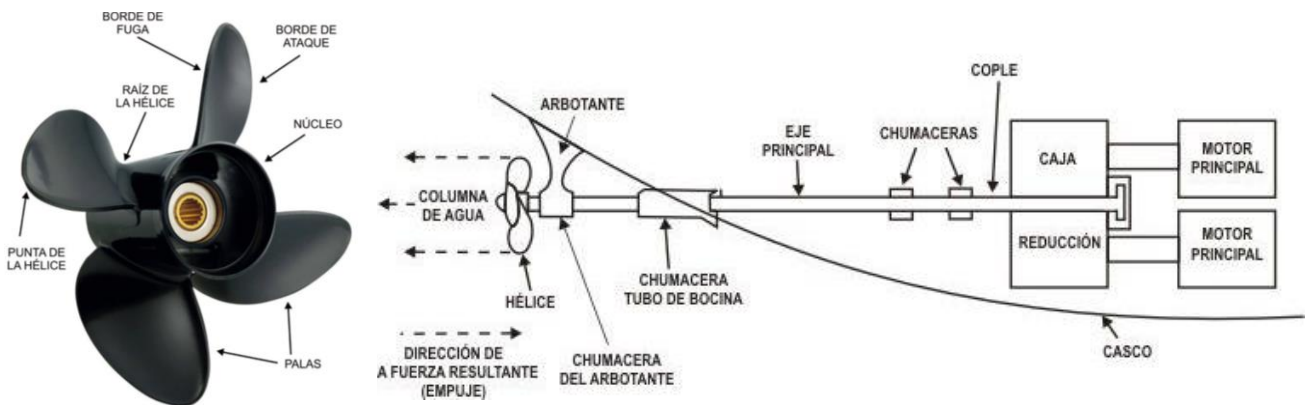


Figura 2-9 – Esquema de una Hélice [36] y de un Eje de Transmisión [35]

A continuación, se procederá a explicar las propulsiones más comunes siguiendo la Figura 2-10.

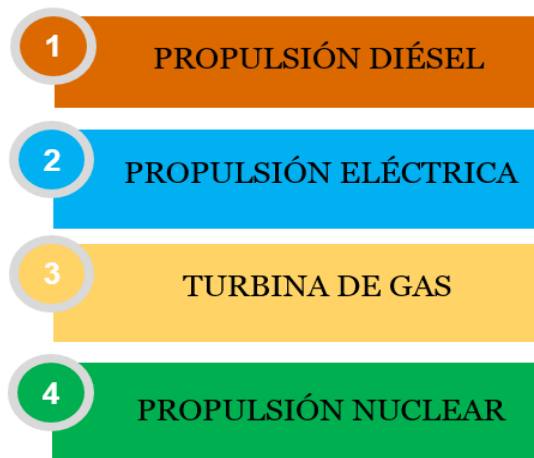


Figura 2-10 Esquema propulsiones más comunes (elaboración propia)

➤ Propulsión diésel:

Es el sistema propulsor más empleado tanto en los buques como en vehículos terrestres. Desde su invención a finales del siglo XIX, existen principalmente dos variantes de éste: 2 tiempos y 4 tiempos, que son ampliamente utilizados en los buques de hoy en día [37]. En la Figura 2-11 se puede ver la representación simplificada de los dos tipos de carrera de cilindro más comunes

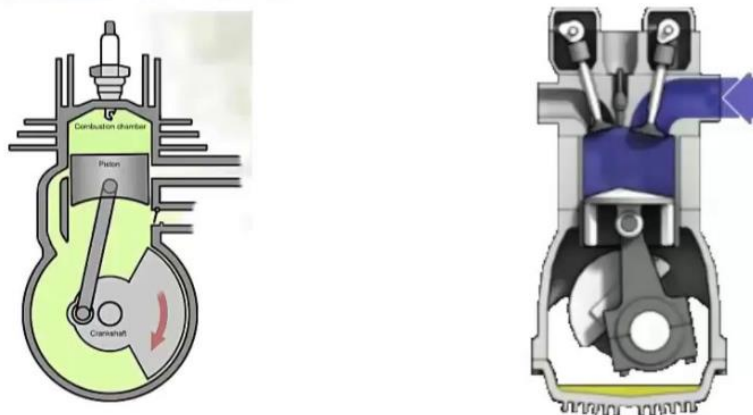


Figura 2-11 – Cilindro 2 Tiempos y 4 Tiempos [37]

Son los que mayoritariamente se emplean en buques de gran tonelaje, estos motores de baja velocidad van acoplados al eje transmisor sin necesitar ningún tipo de reducción. Son capaces de entregar grandes potencias, llegando incluso a los 50.000 CV. Los motores de media y alta velocidad entregan una potencia de entre 100 CV hasta los 10.000 CV, por lo que se utilizan en embarcaciones recreativas, cruceros, mercantes y buques de guerra [34]. Este tipo de propulsión es el más utilizado ya que no todos los buques son de gran tonelaje debido al precio excesivo de construcción y mantenimiento. Lo más común es encontrar motores diésel propulsores combinados con otro tipo de motor que obtenga la energía por otro proceso distinto.

➤ Motor eléctrico:

Su medio de obtención de la energía se realiza a través de generadores (motores diésel, turbinas...), que más tarde se almacena en transformadores o baterías y de esta pasa al propio motor eléctrico, el cuál transmite esta energía a la hélice por medios del eje transmisor [38]. Como se puede observar en la Figura 2-12.



Figura 2-12 – Propulsión diésel-eléctrico [38]

La propulsión eléctrica genera una menor contaminación y una disminución significativa de la emisión de ruidos y vibraciones. Además de conseguir una mejoría en la maniobrabilidad y un aumento significativo en el ciclo de vida de la planta propulsora. Con este medio se pueden llegar a conseguir hasta 30.000 CV a pleno rendimiento [39].

El inconveniente estaría en que es mucho más caro y cuando tienen alguna avería, requieren de una gran complejidad para solventarla. Por lo que habría que revisar su propósito para aprovechar sus ventajas y reducir las desventajas al mínimo. Son ampliamente usados en ferrys, rompehielos, remolcadores y últimamente en buques militares para las armadas con mayor poder adquisitivo.

Un ejemplo sería el “Yara Birkeland”, el primer buque completamente eléctrico y además autónomo. Cuenta con una batería de 7 MWh, alcanzando una velocidad máxima de 13 nudos y con una capacidad de carga de 120 toneladas. Estos datos no son impresionantes, pero el hecho de que lo consiga de manera autónoma y sin emitir contaminación lo hace una propuesta muy interesante que ya es real desde el año 2021. En la Figura 2-13 se ve el buque “Yara Birkeland” saliendo a la mar [40].



Figura 2-13 – Buque “Yara Birkeland” [40]

➤ Turbina de gas:

Las turbinas de gas marítimas se desarrollaron a partir de que Frank Whittle las inventara en 1930 para la aviación. Los materiales que lo componen, soportan altas temperaturas y producen una velocidad alta, esta propulsión tuvo su auge en la Segunda Guerra Mundial. En la Figura 2-14, se ve un esquema simplificado de una Turbina de Gas [41].

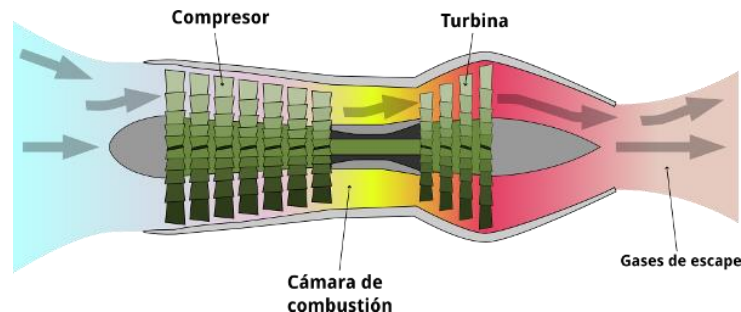


Figura 2-14 Esquema de una Turbina de Gas [41]

El proceso que rige la turbina comenzaría con la entrada de aire por el compresor, este aire en cada pala, es comprimido aumentando la temperatura y la presión. A continuación, entra en la cámara de combustión que reacciona con el combustible, el producto de esta fase genera el movimiento de las palas de la turbina moviéndola y expulsando los gases por el escape.

Este tipo de propulsión es caracterizado por entregar grandes potencias, en torno a 50.000 CV, lo que resulta en grandes velocidades. Tiene una gran suavidad en el funcionamiento y ausencia de vibraciones, es ideal en la lucha antisubmarina. El inconveniente está en que consume mucho combustible comparado con el motor diésel, su mantenimiento es crítico, pues requiere de una gran precisión por lo que conlleva a unos sistemas de control muy complejos con muchos parámetros y factores a tener en cuenta. Es común este tipo de propulsión en buques de guerra y no en barcos civiles, puesto que no se requiere altas potencias y capacidades en su desempeño [42].

En su utilización cabe destacar que se suele emplear en sistemas combinados ya que consiguen una velocidad mayor que la máxima que se puede obtener con un motor diésel o eléctrico. También existe la posibilidad de emplear dos turbinas de gas como única propulsión del buque. Las revoluciones de la turbina deben estar cerca de su máximo nivel de potencia para una mayor eficiencia del combustible, ya que por sí mismo, consume entre 3 y 9 veces más combustible que un motor diésel.

Se muestra en portaaviones Invencible de la Royal Navy que emplea solo turbinas de gas para su propulsión, logrando una potencia de 97.000 CV y con velocidades de hasta 33 nudos como máximo. En la Figura 2-15 aparece el HMS “Ark Royal” [43].



Figura 2-15 – HMS “Ark Royal” [43]

➤ Propulsión nuclear:

Se consiguió el primer reactor nuclear en 1953 en Estados Unidos para el submarino USS “Nautilus”. De este modo se marcó la historia de los submarinos ya que podían mantenerse durante semanas bajo el agua a una velocidad de 20-25 nudos [44].

Explicado de forma somera, consiste en una propulsión a vapor sin alcanzar elevadas temperaturas ya que el reactor nuclear no tolera grandes fuentes de calor. El funcionamiento del reactor se basa en la fisión nuclear, existen ciertos elementos pesados que cuyos núcleos al ser bombardeados de neutrones de baja energía, se separan en dos núcleos aproximadamente iguales, menos pesados, con un mayor número de neutrones y un resto de masa resultante por la fisión del núcleo. Esta masa resultante es la que produce la energía calorífica de acuerdo a la Ley de Einstein ($E = m \cdot c^2$). En la Figura 2-16 aparece un esquema simplificado de la propulsión nuclear explicando esto.

Existen varios reactores nucleares pero el más utilizado en los buques de propulsión nuclear es de agua a presión. En donde el núcleo se mantiene a presión para que el agua no hierva en su interior. Este tipo de propulsión requiere de un mantenimiento muy costoso y no todos los países se pueden permitir este sistema propulsor. Además, sus residuos son radiactivos. Estos se suelen almacenar en contenedores enterrados a gran profundidad y la posibilidad de eliminarlos es muy complicada y peligrosa, además de afectar negativamente a la biodiversidad de la zona, a la salud y provoca malformaciones en los seres humanos.

Aunque la principal ventaja es que se puede estar navegando de forma indefinida y a una gran velocidad, lo que da un gran poder disuasión para el resto de países [45]. Solo hay que regresar a puerto porque se necesitan víveres para la supervivencia de la dotación.

Pressurized-water Naval Nuclear Propulsion System

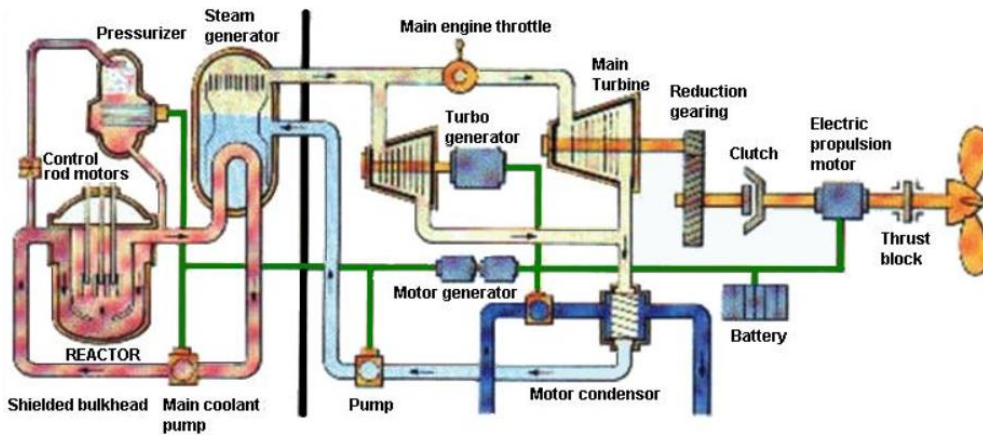


Figura 2-16 – Esquema de un Sistema Propulsor Nuclear [45]

2.3.3 Sistemas de propulsión combinada:

Emplea dos sistemas distintos para suministrar potencia normalmente a un único árbol hélice. Mediante un sistema de transmisión y embragues permite el acople de los sistemas propulsores distintos a dicho árbol transmisor. De esta forma permite el aprovechamiento de diferentes sistemas de propulsión dependiendo del propósito. Por ejemplo: sería más adecuado una propulsión de gas si se requieren altas velocidades o un sistema de propulsión eléctrico para una navegación silenciosa o de rápida maniobrabilidad, como puede ser las entradas y salidas de puertos [46]. A continuación, se mostrarán las combinaciones más empleadas:

- CODAD (COmbined Diesel And Diesel)

Son dos sistemas de propulsión diésel que aportan potencia a un único árbol hélice. Por medio de embragues y acoples acoplan los distintos motores. Son los más típicos y que menor coste tienen por estar ya estandarizados. El inconveniente estaría en que los motores diésel no pueden entregar mucha potencia para alcanzar velocidades superiores a 22 nudos cuando el buque es de gran porte. Un ejemplo sería la corbeta francesa de la clase Gowind [47] mostrada en la Figura 2-17 junto con un esquema de la propulsión CODAD.

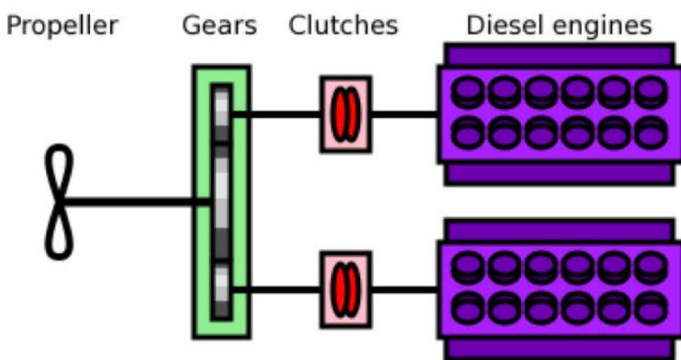


Figura 2-17 Esquema CODAD [46] y corbeta clase Gowind francesa [47]

➤ CODOG (COmbined Diesel Or Gas)

Diseñado para buques que requieran una mayor velocidad máxima en comparación a su velocidad económica. Estos son ampliamente empleados en corbetas modernas y fragatas (Clase Santa María). Por cada árbol hélice existe un motor diésel para la velocidad de crucero y una turbina de gas para la velocidad máxima. Cabe destacar que la turbina de gas requiere de transmisión y reducción mecánica para poder aportar la energía de manera eficiente y no dañar ningún componente. Tanto el motor diésel como la turbina de gas están conectados mediante embragues, pero solo se puede usar uno a la vez no ambos. Un ejemplo de esta propulsión sería la F-102 Juan de Borbón [48] de la Armada Española junto con su esquema de propulsión, representada en la Figura 2-18.

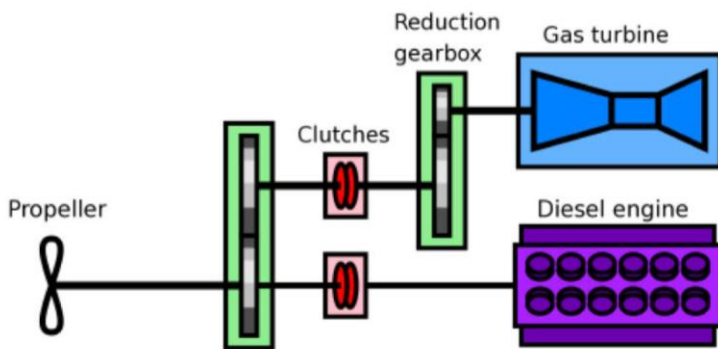


Figura 2-18 Esquema CODOG [46] y fragata F100 española [48]

La ventaja que poseen este sistema propulsor es que requiere una transmisión más simple a expensas de requerir turbinas más potentes y el consumo es mucho mayor comparado con CODAG.

➤ CODAG (COmbined Diesel And Gas)

El requisito para optar a este sistema de propulsión es el mismo que CODOG, que se requiera una velocidad mayor que la velocidad de crucero. La ventaja de este es que ocupa menos espacio, se pueden emplear motores diésel más pequeños, posee una alta eficiencia de gasto de combustible en motores diésel para velocidad de crucero. Un ejemplo sería la fragata noruega de la clase Fridtjof Nansen [49] junto con el esquema CODAG en la Figura 2-19.

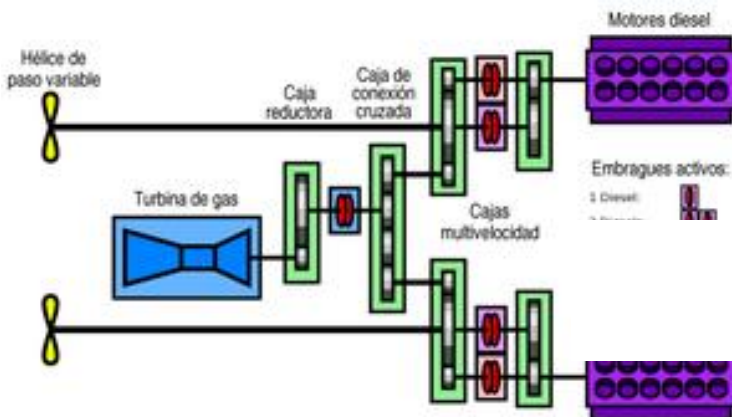


Figura 2-19 Esquema CODAG [46] y fragata clase Fridtjof Nansen Noruega [49]

Sin embargo, presenta problemas como puede ser un sistema de transmisión más complejo, pesado y sensible a averías. Requiere de una caja de transmisión multivelocidad que se acople y se desacople cuando se vaya o no a emplear la turbina. Se necesitan diferentes relaciones de velocidad para la caja de conexión cruzada, las opciones son: funcionamiento del motor diésel solamente, ambos motores diésel siendo utilizados a la vez y cuando se acopla la turbina de gas a la propulsión diésel.

➤ COGAG (COmbined Gas And Gas)

Se emplean dos turbinas de gas acopladas a un único árbol hélice, Mediante un sistema de embragues permite la conexión de una o ambas turbinas a la vez.

La eficiencia del uso del combustible se consigue cuanto más cerca esté del máximo nivel de potencia, por lo que utilizar una turbina de menor dimensión que otra de mayor, sería más económico y eficiente ya que una turbina esté trabajando a una potencia menor que la óptima se considera una pérdida de combustible por su baja efectividad en el empleo de carburante. En comparación con el sistema CODAG y CODOG, los COGAG consiguen mejorar el espacio empleado, pero son menos eficientes a velocidad crucero. Este tipo de propulsión, aunque se consiga trabajar siempre a su máxima eficiencia, sigue consumiendo más que el resto de propulsiones anteriormente expuestas. En la Figura 2-20, aparece la fragata MEKO 200 HN [50] de la marina griega junto con un esquema COGAG.



Figura 2-20 Esquema COGAG [46] y fragata MEKO 200 HN griega [50]

➤ COGOG (COmbined Gas Or Gas)

Este sistema propulsor no requiere de cajas de engranajes pesados, son muy costosos y no poseen una alta fiabilidad en su funcionamiento. Se puede acoplar cualquiera de las turbinas, pero sólo una en el árbol hélice. La principal diferencia reside en que una turbina es de mayor porte y la otra de menor, para las distintas velocidades, se emplea una u otra. En este sistema, la caja de cambios no requiere de una alta complejidad ya que solo se puede acoplar una turbina independientemente de la otra turbina. En la Figura 2-21, aparece un ejemplo de esta propulsión, la fragata tipo 42 [51] británica y un esquema simplificado.

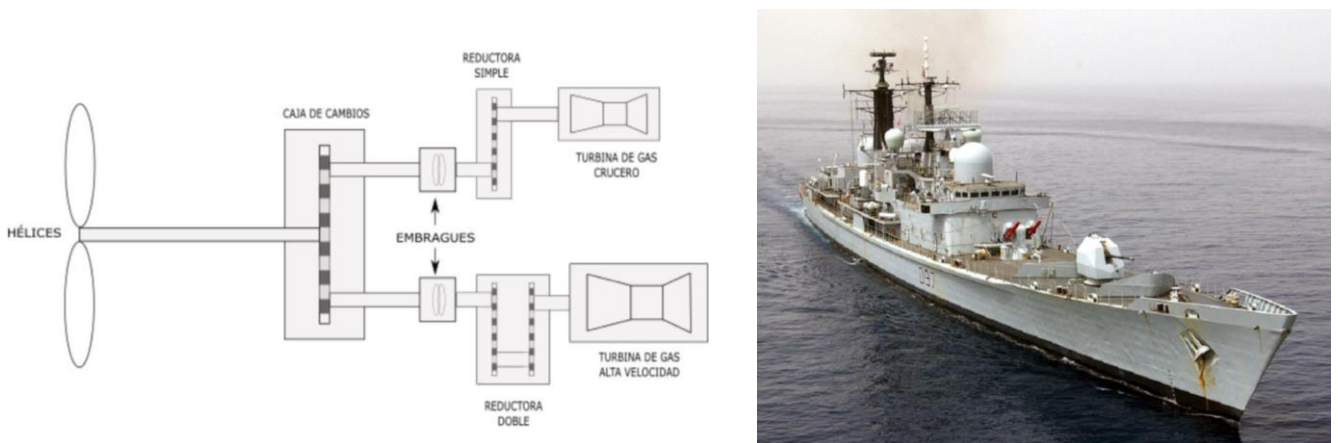


Figura 2-21 Esquema COGOG [46] y fragata tipo 42 Royal Navy [51]

➤ COSAG (COMbined Steam And Gas)

Combinación de turbinas de vapor y de gas, se pueden utilizar ambos a la vez o uno solo. Posee la eficiencia a velocidad económica y la fiabilidad del sistema a vapor permitiendo una rápida aceleración y breve tiempo de arranque de la turbina de gas. Este sistema fue ampliamente usado en la primera generación de barcos de guerra con turbinas de gas. Pero ya se está procediendo a darlos de baja por su obsoleto sistema de vapor y escasez de componentes que ya no se fabrican. En la Figura 2-22, se muestra el destructor chileno de la clase County [52] y un esquema de COSAG.

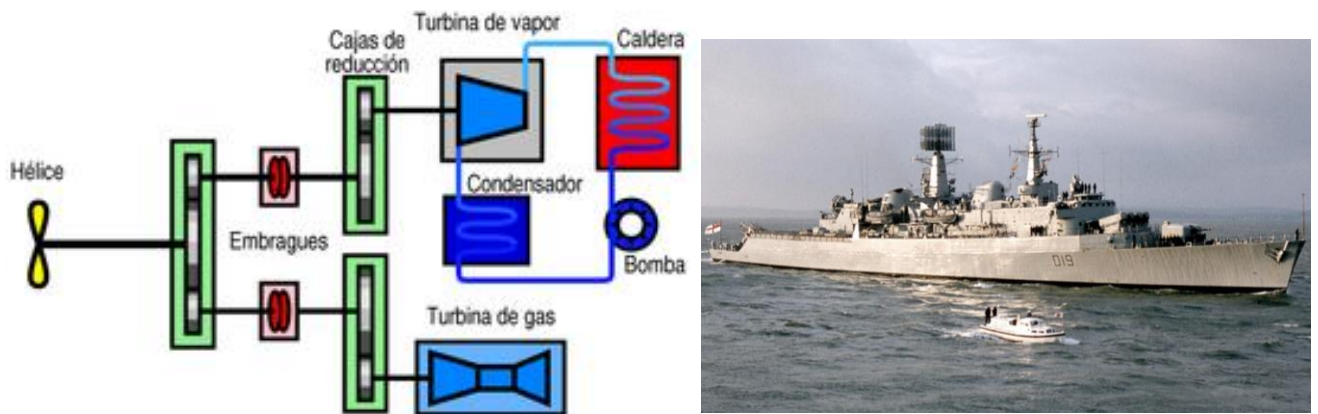


Figura 2-22 Esquema COSAG [46] y destructor clase County chileno [52]

➤ CODLAG (COMbined Diesel eLectric And Gas)

Modificación al sistema CODAG, emplea motores eléctricos alimentados por diésel-generadores y una turbina de gas por eje transmisor. La turbina de gas es empleada para velocidades mayores mediante una caja de conexión cruzada, el cual se desacopla para velocidades en torno a la velocidad crucero e inferiores.

De este modo combina los motores diésel propulsores y generadores. La ventaja reside en un menor mantenimiento de los motores eléctricos, además de trabajar estos en un rango mayor de revoluciones y ser conectados de forma directa al árbol de la hélice, de este modo se logra transmisiones más simples. Otra ventaja a destacar es que los diésel-generadores pueden ser aislados acústicamente de la plataforma, haciéndola mucho más silenciosa cuando se emplea este sistema. Por lo que es frecuente ver este sistema

empleado en buques destinados a operaciones antisubmarinas. En la Figura 2-23, aparece la futura F110 [53] de la marina española y su esquema simplificado de propulsión.

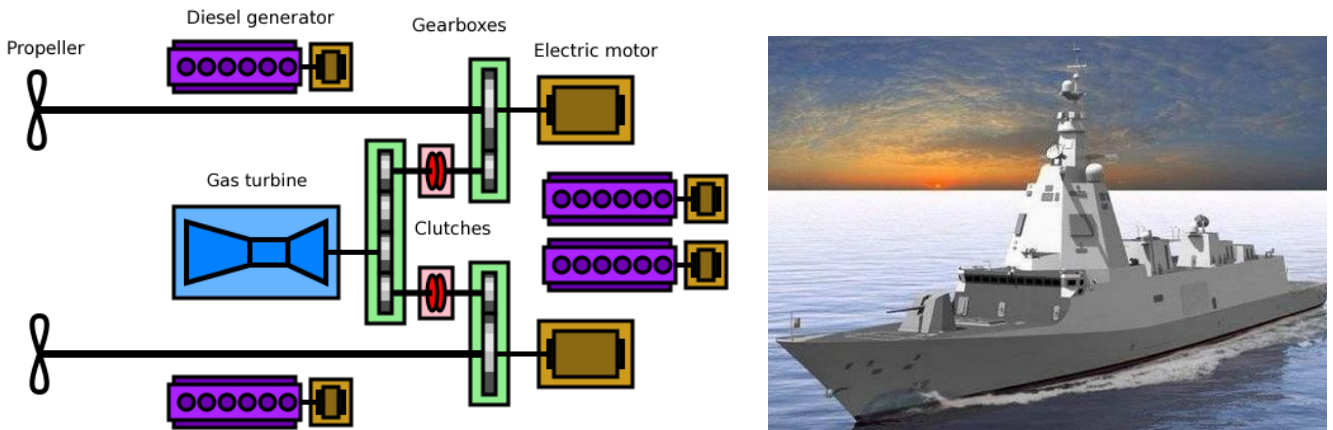


Figura 2-23 Esquema CODLAG [46] y futura fragata F110 española [53]

➤ CODLOG (COMbined Diesel eLectric Or Gas)

Contiene los mismos elementos básicos que CODLAG, pero no se puede emplear los dos sistemas a la vez. Para velocidades crucero solo se utiliza los motores eléctricos, y para mayores ya entrarían en juego las turbinas de gas. En la Figura 2-24, aparece la fragata francesa FREMM [54] y un esquema simplificado de la propulsión CODLOG.

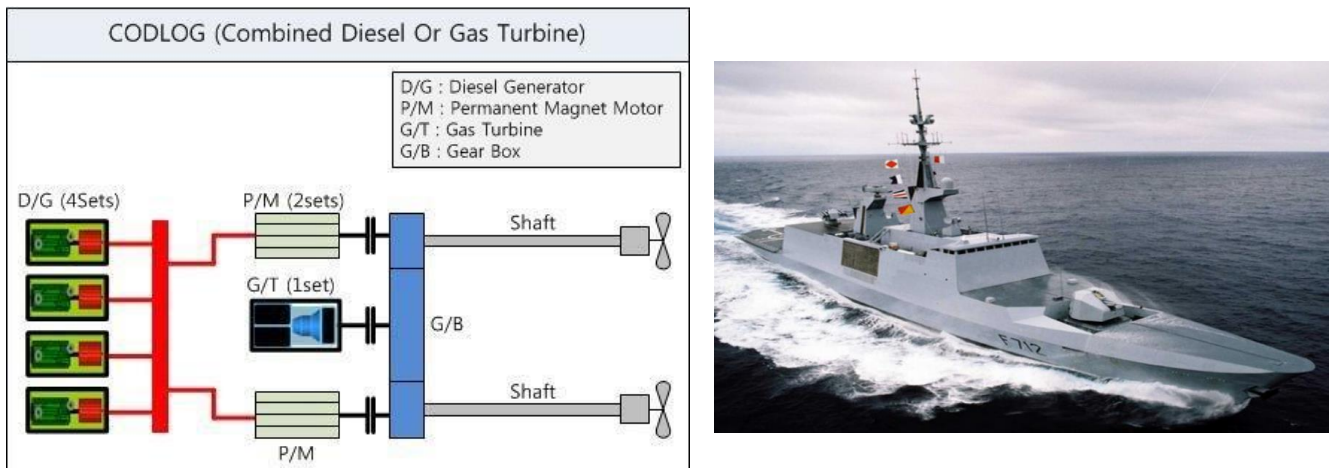


Figura 2-24 Esquema CODLOG [46] y fragata FREMM multipurpose francesa [54]

➤ CODOE (COMbined Diesel Or Electric)

Este sistema emplea dos motores diésel o motores eléctricos para un único árbol transmisor. Los motores diésel actuales cubren en su inmensa mayoría todo el rango de velocidades requeridas, poseen una sala de máquinas más sencilla, un menor consumo en combustible, mayor aligeramiento de pesos y simplificación de las reductoras. En la Figura 2-25, se muestra el buque Meteoro [55] español y un esquema CODOE.

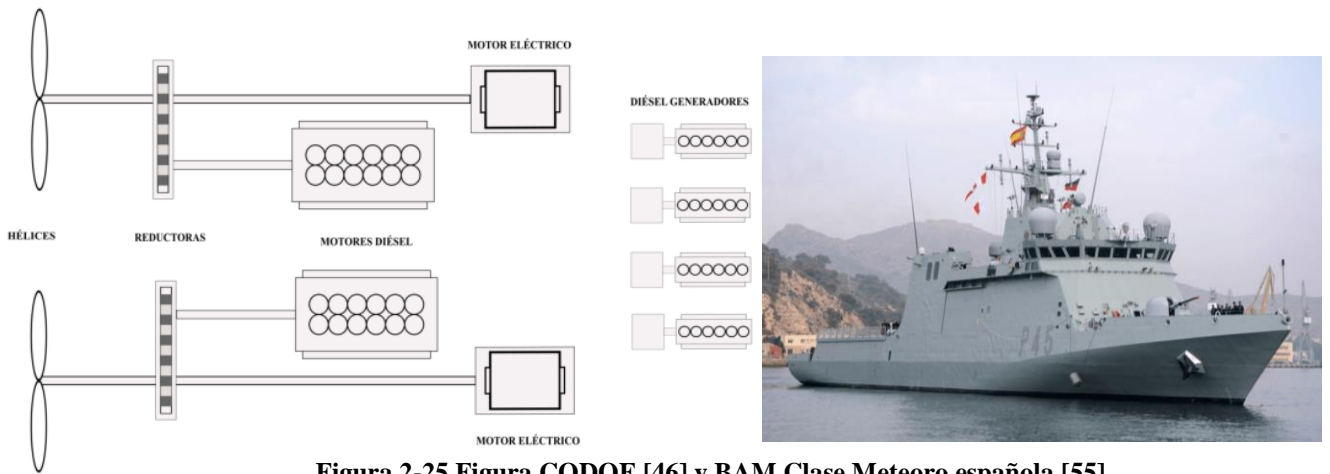


Figura 2-25 Figura CODOE [46] y BAM Clase Meteoro española [55]

A modo de resumen, se muestra la Tabla 2-3 con las principales ventajas e inconvenientes de cada sistema propulsor

SISTEMA COMBINADO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
CODAD	+ Sencillez + Estandarizado + Único árbol hélice	- Baja velocidad - Anticuado
CODOG	+ Velocidad máxima + Transmisión simple + Fiable	- Consumo combustible - Diésel o gas, no ambos - Menor potencia
CODAG	+ Velocidad máxima + Diésel y gas a la vez + Ocupa menos espacio	- Transmisión compleja - Menos fiable
COGAG	+ Configuración distinta + Ocupa poco espacio	- Consumo combustible - Transmisión compleja - Menos fiable
COGOG	+ Caja engranaje sencilla + Eficiencia combustible	- Coste - Menor rango de velocidades
COSAG	+ Aceleración + Fiabilidad	- Anticuado - Contaminación
CODLAG	+ Variedad velocidades + Poco ruido + Transmisión simple	- Conocimiento motor eléctrico - Consumo
CODLOG	+ Consumo + Eficiencia combustible	- Gas o eléctrico, no ambos - Transmisión compleja - Conocimiento motor eléctrico

CODOE	+ Eficiencia combustible + Menor espacio y peso + Transmisión simple	- Conocimiento motor eléctrico - Menor velocidad
-------	--	---

Tabla 2-3 Ventajas y desventajas de los sistemas combinados (elaboración propia)

Sintetizando todos los sistemas combinados que se han visto, los más empleados y clases de buques que más se emplean en las marinas de guerra, son los que se muestran a continuación en la Figura 2-27 y Figura 2-26. Donde se puede ver que el sistema más utilizado es el CODOG en fragatas ya que son los que están más estandarizados y es más sencillo de construir.

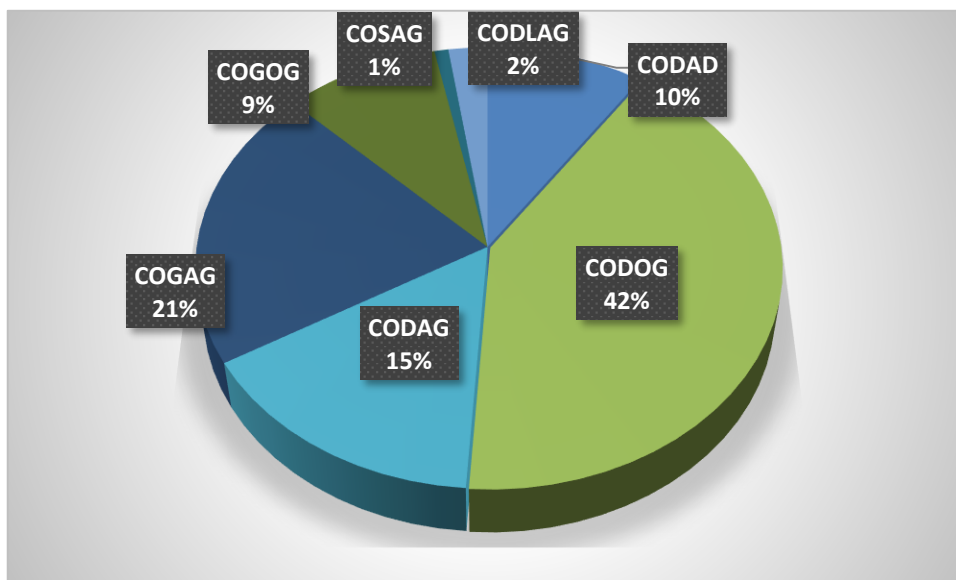


Figura 2-27 Sistema combinado más empleado (elaboración propia)

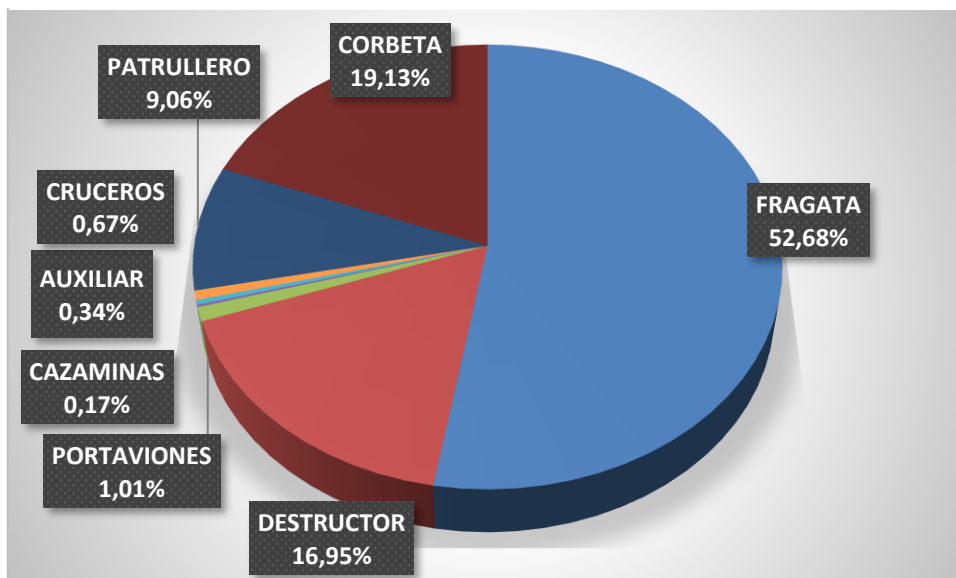


Figura 2-26 Clases de buques más construidos (elaboración propia)

Las líneas de investigación tienden a contribuir a un mundo más eficiente construyendo sistemas propulsores más sencillos que no exijan una formación previa para poder realizar un correcto mantenimiento de la máquina propulsora, reducir el precio de coste para que todos los países puedan permitirse construir buques sostenibles y la reducción de la tasa de mortalidad en las maniobras que

exijan mano de obra como remolcadores haciendo de estos buques autónomos con inteligencia artificial y supervisados desde el puerto.

De este modo se conseguiría reducir eficientemente las tasas de contaminación de los actuales sistemas propulsores. Los nuevos materiales de ensamblaje del buque podrían ser una aleación de entre acero, aluminio y material reciclado. Significando ahorro en combustible por su reducción de peso y un aumento de la carga. Esto permitiría la introducción de sensores dentro del material de construcción del buque para comprobar que está en buen estado y no requiere de mantenimiento.

En la Figura 2-28, se muestra de forma resumida donde convergen las futuras líneas de desarrollo.



Figura 2-28 Figura de líneas de desarrollo (elaboración propia)

3 ANÁLISIS ACTUAL DE LAS FRAGATAS ESPAÑOLAS

3.1 Fragatas F-100 y F-80

Las fragatas españolas están formadas actualmente por sistemas propulsores combinados ya vistos en 2.3.3. Las fragatas clase “Santa María” (F-80) y las fragatas clase “Álvaro de Bazán” (F-100).

Las fragatas clase “Santa María” tienen un sistema COGAG (COmbined Gas And Gas) formado por dos turbinas LM2500 con un solo árbol hélice. Se muestra en la Figura 3-1 una fragata de esta clase [56].



Figura 3-1 Fragata Canarias F-85 Clase “Santa María”
[56]

Las fragatas clase “Álvaro de Bazán” tiene un sistema CODOG (COmbined Diesel Or Gas) con dos ejes transmisores, formado por una turbina LM2500 y un motor diésel Bazán Bravo-12 por cada árbol transmisor. Se muestra en la Figura 3-2 una fragata de esta clase [57].



Figura 3-2 Fragata Méndez Núñez F-104 Clase “Álvaro de Bazán” [57]

El caso de estudio seleccionado será la fragata Méndez Núñez ya que posee un sistema combinado que emplea un sistema CODOG para la propulsión. También el ciclo de vida de este buque es mayor que el de las fragatas clase “Santa María”, pues estas ya han pasado su ciclo de vida operativo y están a la espera de la sustitución por las futuras F-110. Su puerto base comparte instalaciones con el Astillero Navantia que es el encargado de hacer los mantenimientos y reparaciones de mayor porte, por lo que una sustitución de combustible o reestructuración del diseño para una planta de tratamiento de gases en el buque, resulta mucho más sencillo en esta disposición. A continuación, se procederá a analizar su sistema combinado, así como sus características generales junto con la Figura 3-3.

➤ Características generales:

- Desplazamiento: 5.400 Toneladas
- Eslora: 147 m.
- Manga: 18,5 m.
- Calado: 4,75 m.
- Velocidad: 29 nudos (54 km/h)
- Dotación: 216 personas.
- Astillero: Navantia.
- Coste unidad: 500 millones de €.
- Botadura: 21 de marzo de 2006.
- Autonomía: 4.500 millas a 18 nudos (33 km/h)



Figura 3-3 Dimensiones F-100 (elaboración propia)

3.1.1.1 Planta propulsora:

La planta propulsora proporciona la energía mecánica y los medios necesarios para propulsar el buque en adelante (adelante) y atrás, facilitando su maniobrabilidad. Consta fundamentalmente de dos motores diésel y dos turbinas de gas acopladas mediante embragues y dos engranajes reductores que mueven por medio de las líneas de ejes a las hélices. Esta planta está totalmente controlada remotamente

y automatizada por el SICP (Sistema Integrado de Control de la Plataforma). A este conjunto de le conoce como planta CODOG, este tipo de propulsión se ha explicado con más detalle en 2.3.3.

La planta propulsora está compuesta por: Sistema de Motores Diésel de Propulsión, Sistema de Turbinas de Gas, Engranajes Reductores Principales, Líneas de Ejes de Propulsión y Hélices de Paso Variable. El desarrollo de este punto se centrará en los motores diésel principales y las turbinas de gas.

➤ Motor diésel Bazán Bravo-12 [58].

En la Figura 3-4 se presenta el motor en dos vistas

Este motor procedente de la Empresa Bazán, presenta las siguientes características:

- 12 cilindros en V a 50°.
- Longitud: 4807 mm
- Ancho: 1715 mm
- Altura: 3230 mm
- Potencia continua (T^a aire 25°C; T^a agua salada 25°C): 4370 kW
- Potencia máxima (T^a aire 25°C; T^a agua salada 25°C): 4625 kW
- Diámetro pistón: 280 mm
- Carrera pistón: 300 mm
- Ciclo: 4 tiempos
- Orden de encendido: 1-6-7-10-3-2-11-8-5-4-9-12
- Cilindrada total: 222 L
- Relación de compresión: 13:1
- Arranque: Arrancador automático
- Peso con fluidos y accesorios: 21620 Kg
- Doble filtro de combustible
- Capacidad del cárter: 910 L
- Refrigeración doble con agua dulce.
- Refrigeración con agua salada.

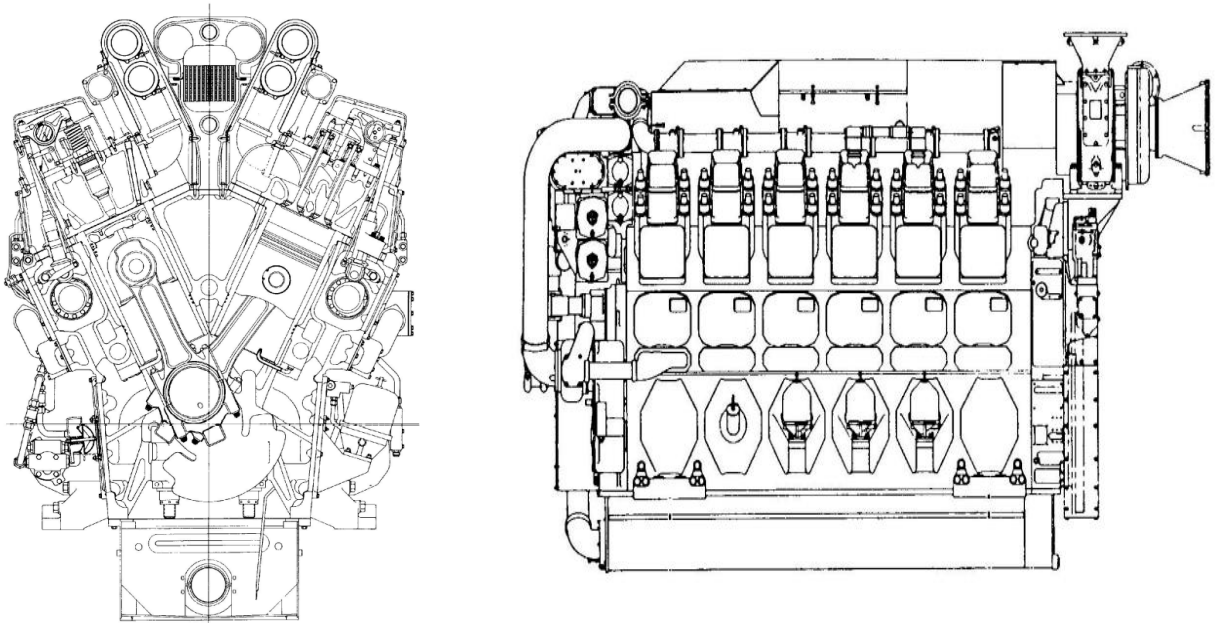


Figura 3-4 Corte [58] y Vista Lateral Motor Diésel Bazán Bravo-12 [58]

➤ Turbinas de gas General Electric LM2500.

Las turbinas de gas están ampliamente utilizadas en buques de guerra ya que ofrecen velocidades altas y una capacidad de reacción mayor. Aunque también es empleado en buques civiles, cada vez está siendo menos utilizado debido a su alto consumo en combustible y en estos buques no se requieren de altas velocidades ya que siempre trabajan en el mismo régimen de revoluciones.

Las turbinas GE (General Electric) LM2500 poseen varios modelos, que se muestran en la siguiente Tabla 3-1:

	<i>LM2500</i>	<i>LM2500+</i>	<i>LM2500+G4</i>
<i>Peso (kg)</i>	4672	5237	5237
<i>Potencia (MW)</i>	25,06	30,20	36,98
<i>Consumo combustible (g/KW-h)</i>	226,9	215,3	214,1
<i>Revoluciones por minuto (rpm)</i>	3600	3600	3600

Tabla 3-1 Comparación turbinas GE LM2500 (elaboración propia)

La turbina fabricada por la empresa General Electric, en concreto es el modelo LM 2500, mostrado en la Figura 3-5, empleado actualmente en las fragatas F-100 españolas, presenta las siguientes características:

- Potencia máxima: 17.500 kW
- Velocidad de la turbina de potencia: 3.600 rpm
- Temperatura de aire de admisión: 38°C

- Presión atmosférica: 1.013 bar
- Humedad relativa: 70%
- Combustible: F-76
- Aceite lubricación: MIL-L23699 NATO CODE 0-156
- Aceite refrigerante: MIL-L-17331
- Sistema de arranque automático
- Sistema de extinción de fuego en el interior del módulo de CO₂

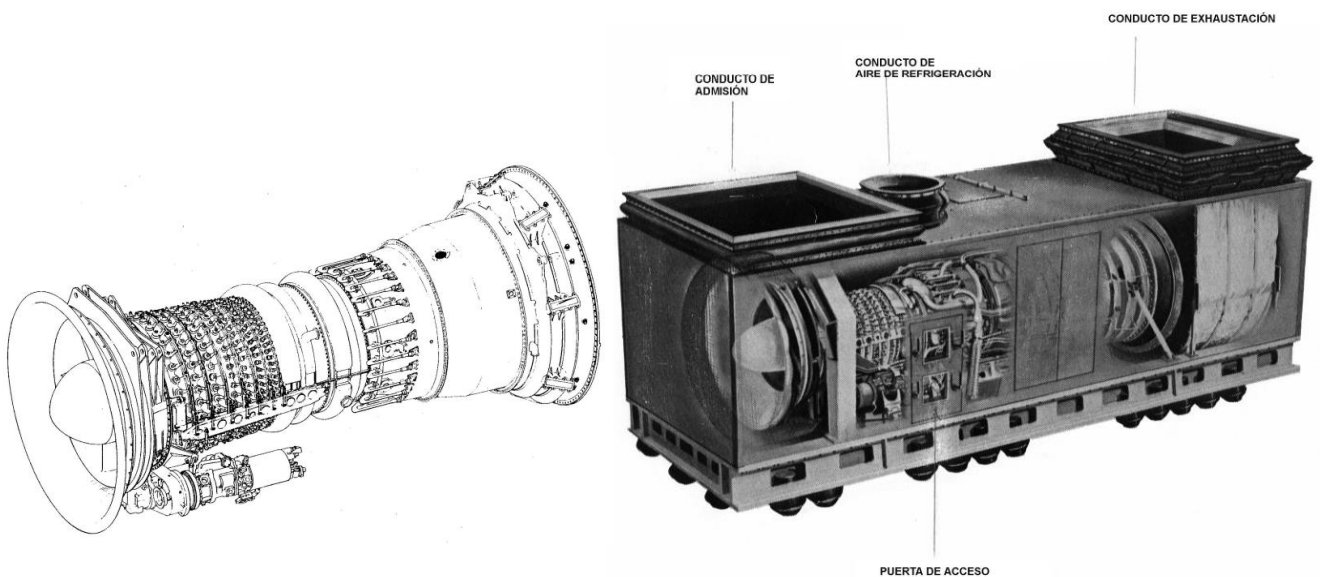


Figura 3-5 Turbina [58] y Modulo con Turbina LM2500 [58]

➤ Sistema CODOG.

Los dos ejes propulsores tienen consigo un engranaje reductor de tren cerrado de Royal Schelde. Incorpora a su vez un embrague por árbol transmisor para permitir el acople y desacople del motor diésel y de la turbina de gas. Estos embragues son auto-sincronizables (SSS). Los reductores y los embragues son de diseño “bajo en ruido” para reducir al mínimo su dispersión acústica y vibraciones [59]. Este sistema combinado está explicado en 2.3.3. En la Figura 3-6, se muestra el sistema combinado de las F-100 españolas de forma más detallada.

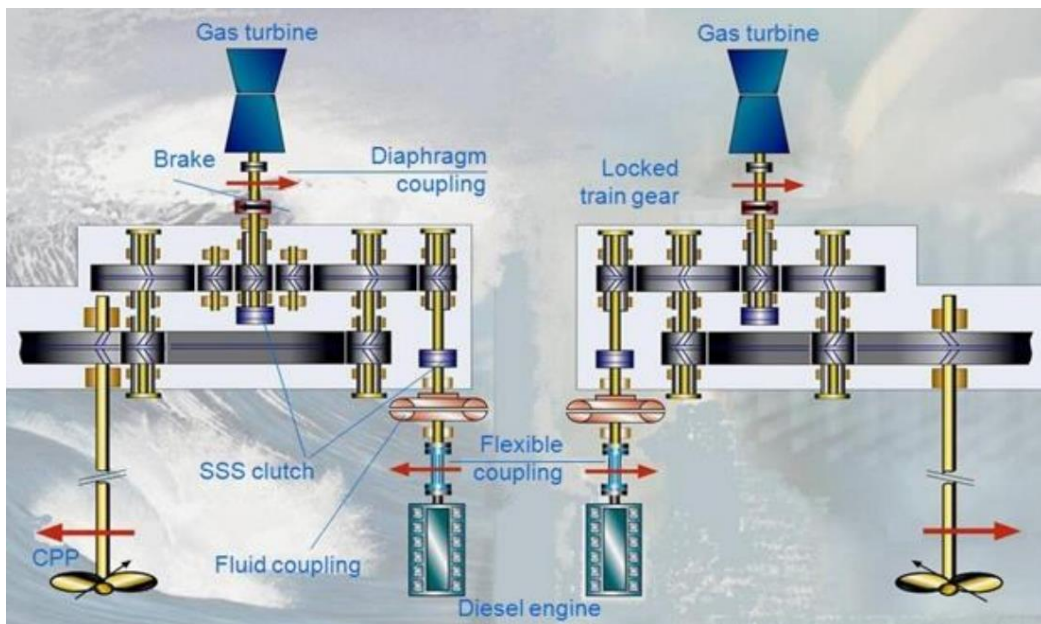


Figura 3-6 Sistema CODOG de las F-100 españolas [59]

➤ *Consumos y coste:*

En la Tabla 3-3 y Tabla 3-2 se muestran los consumos de la F-104 según la velocidad. Se comienza los consumos con el 95% de combustible (714.400 L), en las columnas de autonomías, cuando se indica 50% y 20%, es el restante del volumen del tanque queda de combustible. En el modo turbina, no se tienen en cuenta los consumos de los DDGG (diésel generadores). En el modo diésel sí que se tienen en cuenta (2 generadores son 7200 L al día). Las zonas señaladas en amarillo, representan la velocidad óptima donde se aprovecha más el consumo de combustible. Y la zona roja en el modo diésel, es el régimen máximo de revoluciones que llegaría los motores diésel, a partir de estas revoluciones las vibraciones aumentarían y pondrían en peligro los motores diésel, por lo que a partir de estas velocidades se recomienda acoplar el modo turbina. Señalar que en la columna (x2) es debido a que estos sistemas trabajan con los dos árboles transmisores, lo que implica que están funcionando las dos turbinas y los dos motores diésel.

EVALUACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS Y TECNOLOGÍAS
PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES EN LA PROPULSIÓN DE FRAGATAS

MODO DIÉSEL					
VELOCIDAD NUDOS	CONSUMO HORA	X2	CONSUMO DIA	AUTONOMIA DIAS (50%) 376.000 L	AUTONOMIA DIAS (20%) 150.400 L
10	396	792	19.000	20	30
11	416	832	19.960	19	28
12	446	892	21.400	17,5	26
13	496	992	23.800	16	24
14	596	1.192	28.600	13	20
15	696	1.392	35.600	10,5	16
16	846	1.692	40.600	9	14
17	1.196	2.392	57.400	6,5	10
18	1.346	2.692	64.400	6	9

Tabla 3-2 Consumos modo diésel F-104 (elaboración propia)

MODO TURBINA					
VELOCIDAD (NUDOS)	CONSUMO LITROS HORA	X2	CONSUMO LITROS DIA	AUTONOMIA DIAS (50%) 376.000 L	AUTONOMIA DIAS (20%) 150.400 L
10	1.300	2.600	62.400	5	9
12/13	1.400	2.800	67.200	5	8
15	1.500	3.000	72.000	4	8
17	2.300	4.600	110.400	3	5
21/22	2.900	5.800	139.200	2	4
25/26	4.000	8.000	192.000	1	3
27/28	4.600	9.200	220.800	1	3

Tabla 3-3 Consumos modo turbina F-104 (elaboración propia)

El precio del combustible ronda los 0,6-0,7 € el litro (agosto de 2021), nunca más de 0,7 €. Hay que tener en cuenta que es un precio razonable para la cantidad de combustible que se almacena en los tanques de combustible. El responsable de este precio es el JAL (Jefatura de Apoyo Logístico). El 100% de los tanques ocupa un volumen de 752.000 L, por lo que el precio de rellenarlos con los tanques vacíos sería alrededor de 526.400 €. Aunque esto no suele pasar ya que existe una instrucción del AJEMA

(Almirante Jefe del Estado Mayor de la Armada), que obliga a los buques de guerra de España a informar cuando los tanques alcanzan el 50% de su capacidad total. Siempre que se llegue a este punto se procederá a entrar a puerto para repostar o a través de un FAS (Fueling At Sea), repostar en la mar. Esto no significa que se no se pueda navegar por debajo de la mitad de la capacidad de los tanques para no perder capacidades y autonomía en caso de que surja un enfrentamiento.

3.1.2 Combustible DFM (Diesel Fuel Marine) F-76

El F-76 es el combustible destilado que es empleado normalmente en los motores diésel y turbinas de gas. Tiene unas especificaciones muy estrictas y unos requisitos de control de calidad de almacenamiento y manipulación. Además, este combustible es obtenido de forma directa de las estaciones navales.

Se trata de un combustible formado a través de la combinación compleja de hidrocarburos a través de la destilación del petróleo crudo. Obteniendo un punto de ebullición máximo entre 163°C (grados centígrados) – 357°C. Su punto de inflamación mínimo se encuentra en 60°C.

Señalar que es un MGO (Marine Gas Oil) con un porcentaje de azufre muy bajo (15mg/kg) que es el que se adquiere para la Armada. Por lo que no habría problemas para cumplir con la normativa [60].

Es un combustible potencialmente tóxico para la vida marina, provocando efectos nocivos permanentes. Es un fluido inflamable, así como sus gases derivados. Provoca irritación cutánea, es nocivo si se inhala, puede provocar daños en los órganos si se ha estado expuesto de forma continuada y se sospecha que provoca cáncer [61]. En la Figura 3-7 se muestran los pictogramas que representan el diesel F-76.



Figura 3-7 Pictograma de Peligro del F-76 [61]

Debe de pasar una rigurosa prueba de estabilidad antes de su almacenaje para certificar su seguridad desde el primer momento que se recibe a bordo y durante su almacenaje. De acuerdo con la norma MIL-STD-3004D_NOTICE-1 [62] (Vigilancia de la calidad de los combustibles, lubricantes y productos relacionados). Cuando el combustible supere los requisitos de almacenaje, podrá ser consumido en los próximos 24 meses. En el caso contrario, puede volverse inestable en un periodo mucho más corto, puede ser de varias semanas o meses y no puede ser determinado por el mismo proceso para su almacenamiento. La principal preocupación, es la formación de partículas, lo que obstruye los filtros y la inyección del combustible. Esto se traduce en un mayor mantenimiento, puesto que los filtros se deben de cambiar con mayor frecuencia y especial atención a la inyección de este mismo líquido. Por lo que la idea principal es la de quemar el combustible antes de que sus características empeoren y formen partículas cada vez mayores.

En caso de derrame, hay que retirar las herramientas que provoquen chispas de la zona, detener la fuga, acercarse al vertido a favor del viento y detener su expansión a través de materiales absorbentes como puede ser: arena, tierra o vermiculita. Finalmente llamando a las autoridades portuarias para la limpieza total de la zona.

4 EVALUACIÓN DE COMBUSTIBLES Y TRATAMIENTO DE EMISIONES COMO ALTERNATIVAS

A continuación, se van a analizar las principales fuentes de energía renovables que se pueden sustituir o acoplar junto con el combustible F-76. Siendo estas las que mayor inversión y capacidad de desarrollo están teniendo a día de hoy. Es necesaria una renovación de los combustibles fósiles ya que sus fuentes son limitadas y sus emisiones afectan al medio ambiente y a la salud de la humanidad. En la Figura 4-1 se muestra la posible previsión de la demanda de los derivados del petróleo con respecto al tiempo, se puede ver la necesidad de generar alternativas para poder seguir usando los medios de transporte [63].

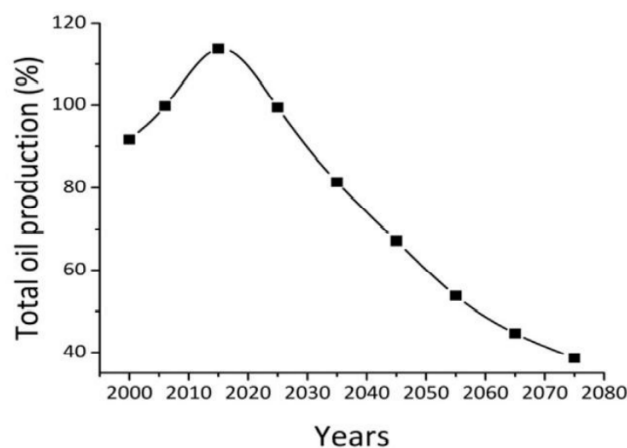


Figura 4-1 Pronostico de producción mundial de petróleo basado en el escenario actual [63]

4.1 Combustibles

4.1.1 Biodiesel

Es un biocombustible que se obtiene de lípidos naturales como, por ejemplo: aceites vegetales o grasas de animales. Obtenido a partir del proceso de esterificación y transesterificación. El objetivo de este combustible no fósil, es la de sustituir o mezclarse con el diésel para reducir las emisiones a la atmósfera. Cuando se mezcla con otro combustible, se clasifica según el porcentaje de biodiesel que

lleve en la mezcla. Si lleva un 20% de biodiesel, será B20, la numeración indica el porcentaje por volumen. En la Figura 4-2 se muestra la elaboración del biodiesel que se explica a continuación [64].

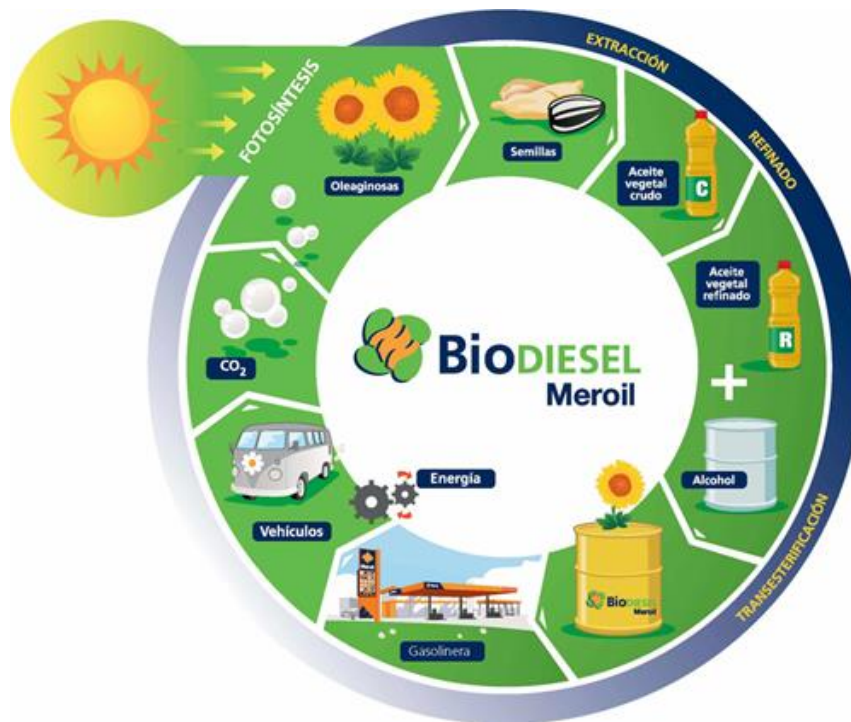


Figura 4-2 Ciclo Biodiesel [64]

El CO₂ generado en la combustión del biodiesel es reutilizado y absorbido por las plantas oleaginosas. De esta planta, se obtiene aceite vegetal, que, refinado y con alcohol, se genera biodiesel. La cantidad de CO₂ emitida depende del porcentaje de biodiesel que tenga el combustible a emplear. El mejor método para obtener biodiesel, es a través de la transesterificación. Existen otras técnicas de obtención como pueden ser el uso directo y mezcla con el gasóleo, micro-emulsiones, etc. La transesterificación presenta las mayores ventajas y facilidades, además de ser el más estandarizado actualmente.

La base del aceite vegetal son triglicéridos (hidrocarburos saturados). Estos aceites tienen una gran viscosidad, pero a través de la transesterificación [65] se reduce esta viscosidad, permitiendo que sea utilizado sin necesidad de modificar el motor. Los triglicéridos reaccionan con alcohol obteniendo como resultado ésteres metílicos y glicerina, el comportamiento de ambos es parecido, pero está comprobado que los ésteres metílicos aportan una potencia superior y menor viscosidad. Esta reacción es realizada a través de un catalizador para obtener la velocidad adecuada. En la Figura 4-3, se puede ver la reacción, se obtiene también glicerina como subproducto.

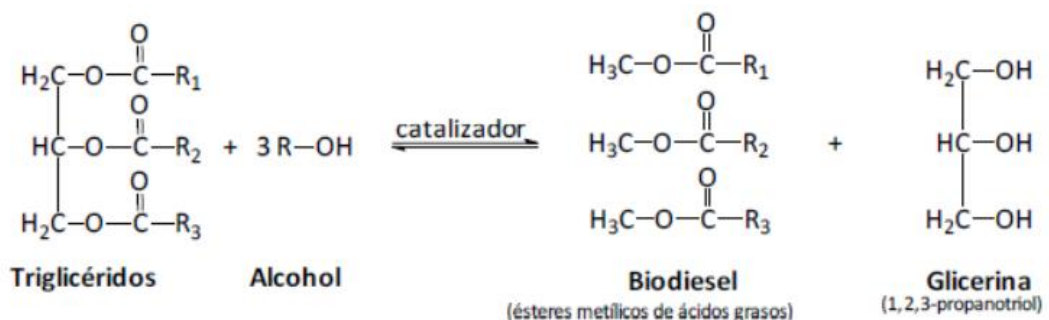


Figura 4-3 Transesterificación [65]

De forma resumida, el biodiesel se obtiene a partir de una reacción en cadena desde triglicéridos a monoglicéridos, alcanzando finalmente glicerina. En este proceso se liberan moléculas de esteres metílicos (biodiesel), es ampliamente aconsejado añadir exceso de alcohol en la reacción para obtener más producto, es decir, más biodiesel.

Las materias primas más utilizadas son: aceites vegetales como colza o girasol, grasas de animales y aceites usados de cocina. Existen países que no puedan desarrollar este combustible de una manera eficiente, como puede ser el caso de Grecia, pues sus cultivos no son suficientes. En el Mediterráneo, abunda el aceite de girasol, oliva y maíz, que junto al aceite de cocina y grasas animales pasan a ser atractivos para la producción de biodiesel. Cabe destacar que la garantía de calidad de estos recursos mediante las especificaciones pertinentes para su correcto funcionamiento, hace que sea una tarea tediosa y complicada para comprobar científicamente su rendimiento [66].

Es conocido que el biodiesel no es tóxico, no contiene aromas, tiene una mayor biodegradabilidad que el gasóleo. Ofrece un manejo más seguro y una menor toxicidad oral y dérmica. Este combustible puede ser empleado en parques nacionales, lagos y ríos.

El biodiesel, se emplea de manera óptima cuando se añade en proporciones adecuadas. Para llegar a la cantidad ideal, se debe de hacer un testeó de las emisiones y del funcionamiento del motor. Ya que añadir más biodiesel de lo requerido, provoca un aumento de emisiones de NO_x. Esto depende del tipo de motor que se llegue a emplear. Por lo general, el B20, funciona de la manera correcta. Incrementa la lubricidad e incrementa el cetano en el combustible. Con este porcentaje, no requiere de cambios en el diseño del motor a utilizar. Ya que, si se supera este porcentaje, el consumo de combustible aumenta y a altas cargas del motor, pierde potencia. Además, su uso en motores navales no está comprobado de una forma eficiente, existen riesgos de congelación y puede dañar el motor. En la Tabla 4-1 se ve de forma resumida las principales ventajas y desventajas del biodiesel.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> + Libre de azufre y aromas + No es toxico + Renovable y biodegradable + Reduce CO_x, SO_x y los hidrocarburos aromáticos + Elimina emisiones CO₂ + Buena lubricidad + Cantidad de cetano, mejora la combustión + Mezcla con biodiesel mejora rendimiento + Reduce consumo de derivados del petróleo + Desarrollo regional sostenible + Empleos en zonas rurales 	<ul style="list-style-type: none"> - Produce más NO_x que el diésel - Posee mayor viscosidad - Congelación en climas fríos - Degradación de materiales, oxidación - Más caro debido a la menor producción de aceite vegetal

Tabla 4-1 Ventajas y desventajas del biodiesel (elaboración propia)

El biodiesel no es suficiente para reemplazar completamente el diésel, es costoso de fabricar, podría aumentar los precios de los alimentos. Se están desarrollando investigaciones para encontrar otras materias que sirvan como fuentes de energía y mejorar el rendimiento. No es sencillo encontrar una materia prima que sea económica y accesible para todos los países y además renovable.

4.1.2 GNL (Gas Natural Licuado)

Este tipo de combustible está formado por gas natural, compuesto en su mayoría por metano (98%) y el resto está compuesto por nitrógeno, etano, propano, y dióxido de carbono. Es inodoro, incoloro y no tóxico. El gas natural es obtenido a través de licuefacción (extracción de gas natural de yacimientos subterráneos) para hacer rentable su transporte. El volumen ocupado es 1/600 de lo que ocupará en su consumo. Para la obtención de la fase líquida, hace falta bajar la temperatura hasta los -162°C , que es cuando el CH_4 pasa a ser líquido. En su almacenamiento, debe de estar en un tanque con doble pared de hormigón armado, acero al carbono y acero niquelado, debido a las consideraciones de seguridad y resistencia. Durante su transporte, se conserva a -162°C , aunque parte del gas se disipa por ebullición (autorrefrigeración) y es aprovechado para la propulsión del buque. El gasero que transporta el GNL, llega a puerto y bombea el GNL en la terminal de regasificación en puerto y este pasa a los tanques portuarios, para lo que se requiere de al menos 12 horas.

El proyecto de establecer GNL en los buques de la actualidad, estará desarrollado a largo plazo, basados en la disponibilidad del mismo, estabilidad de los países que apuestan por el proyecto y donde se produce la venta del gas para su empleo.

El GNL destaca por tener el menor poder contaminante de los combustibles fósiles gracias a sus componentes hidrógeno-carbono que poseen una alta relación en sus componentes. En caso de accidente, estos derrames se disipan en el aire y no contaminan el suelo ni el agua. Para su empleo como combustible, reduce las emisiones de NO_x un 90%, las emisiones de CO_2 un 30% y no produce SO_x . El precio de su adquisición es inferior comparado con el resto de combustibles [67], esto hace que sea un gran atractivo para su implementación en las navieras de la actualidad, ya que cumple con el estricto anexo VI del convenio MARPOL. En la Figura 4-4, se muestra una comparativa de los precios del combustible.

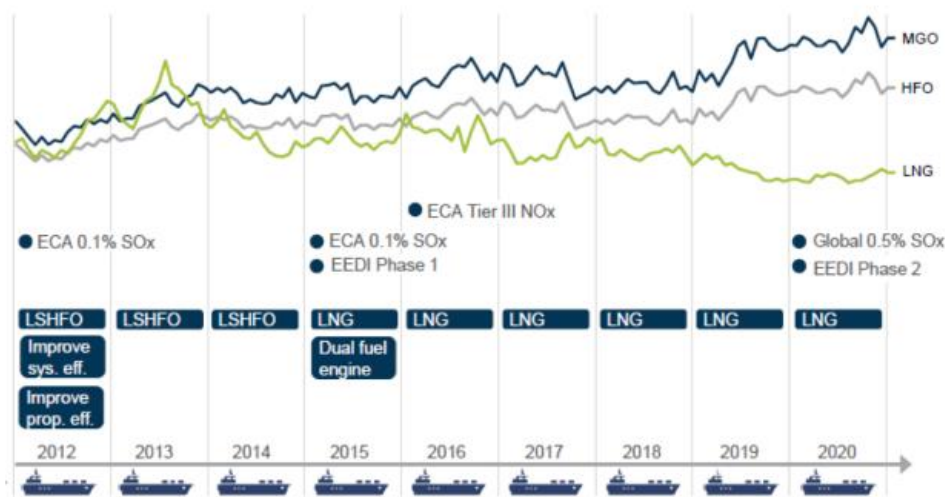


Figura 4-4 Comparativa de Precios de GNL [67]

Pero el problema está en que hay que introducir una red de distribución e instalaciones portuarias que cumplan con los requisitos de este combustible. Con la apuesta de este gas, se pueden reducir eficientemente las emisiones contaminantes y se potenciarían sectores de trabajo como son los puertos y abastecimiento de este combustible. Destacan dos proyectos que apoya España: CORE LNGas hive y S/F Samuel LNG Project.

- CORE LNGas hive

Proyecto de la UE para la fomentación del GNL creado en 2014, empleando a España como “bunkering” por su localización geográfica que la hace clave en términos de transporte marítimo ya que se encuentra al comienzo de Europa [68].

- S/F SamueLNG Project

Es un programa franco-español centrado en Nantes, Le Havre, Rouen, Vigo y Gijón. Apuesta por los buques de mediano y pequeño porte, modificando su planta propulsora para emplear GNL y demostrar su eficiencia [69].

Se está apostando por este proyecto como una alternativa real en el sector marítimo, desempeñando un papel clave en la transición hacia el cambio climático. Actualmente existen en España varias instalaciones de regasificación, 6 completamente operativas para su uso. Encabezando el dominio de este sector respecto al resto de países europeos [70]. En la Figura 4-5 se muestran las estaciones de regasificación en España.

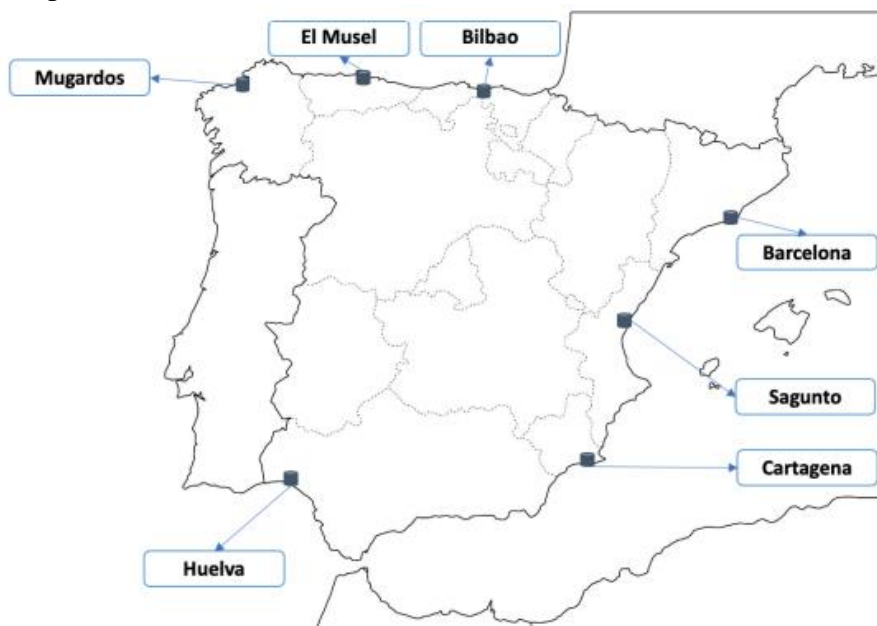


Figura 4-5 Estaciones de Regasificación en España [70]

También es necesario considerar todos los aspectos desde su producción hasta su yacimiento (red de distribución, tanques almacenamiento, proveedores portuarios, etcétera). Son proyectos de varios miles de millones de inversión, haciendo necesario la subvención de compañías de gran poder económico [71]. En la Figura 4-6 se ve la problemática de adquisición de este combustible y en la Tabla 4-2 sus ventajas y desventajas de manera sintetizada.

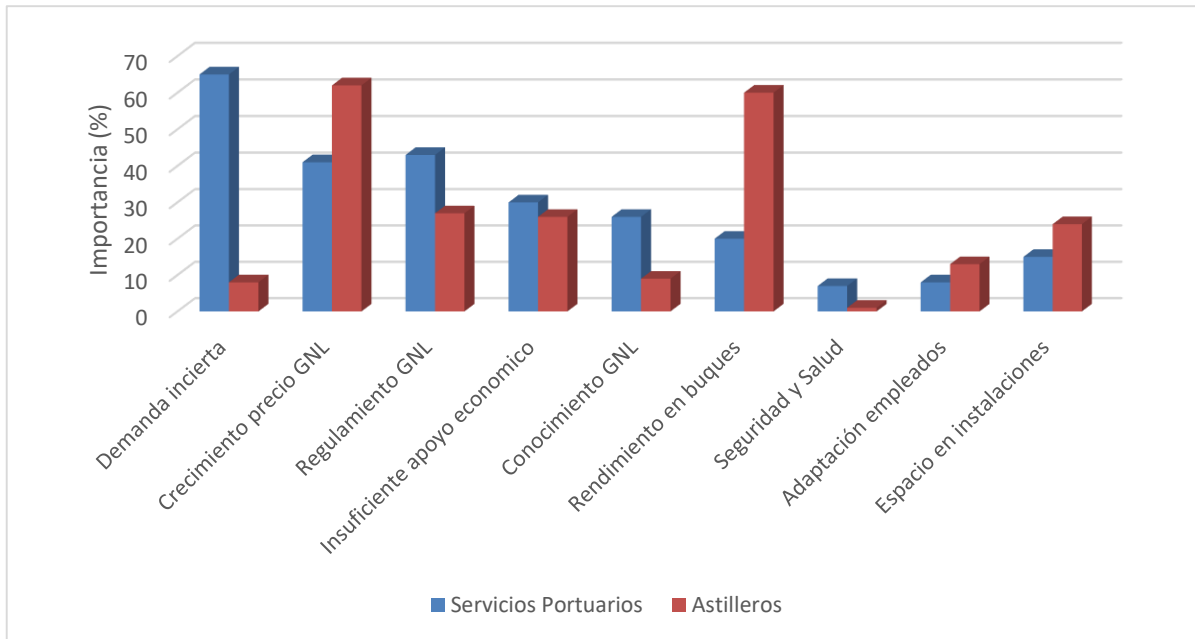


Figura 4-6 Barreras para GNL (elaboración propia basado en [71])

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> + Mayor densidad del combustible + Almacenamiento de menor peso + Reducción de NO_x y CO_x + Existen mayores reservas de gas natural que de petróleo + Ahorro energético + Existen varios puntos de regasificación en España 	<ul style="list-style-type: none"> - Complejidad de los tanques y gran tamaño - Mantenimiento de temperatura y presión más compleja - Altos costes de almacenamiento de partes criogénicas - Si no se usa, se pierde el combustible - Su confiabilidad es dudosa - Mayor coste de compresión - No deja de ser un combustible fósil

Tabla 4-2 Ventajas y desventajas del gas GNL (elaboración propia)

Existen más de 250 buques impulsados por gas GNL actualmente, y otros 100 más en construcción dedicados al transporte marítimo y cruceros. En la Figura 4-7, se muestra un buque Ro-Ro para transporte de vehículos de la empresa Balearia impulsado por GNL [72].



Figura 4-7 Portavehículos Ro-Ro de la Empresa Balearia [72]

Desde el punto de vista de la Armada, Navantia estaría dispuesto a construir buques militares de transporte logístico con GNL, mostrado en la Figura 4-8, como apuesta por un combustible de bajas emisiones y el compromiso de las Fuerzas Armadas españolas con el cambio climático. Reduciendo un 22% el consumo energético respecto a los buques actuales. Este buque no necesitaría de remolcadores por sus propulsores laterales y tampoco de grúas para su carga/descarga. Sin embargo, este proyecto ha quedado en segundo plano ya que, España adquirió los servicios del buque “Ysabel” para transporte logístico, con un sistema de propulsión CODAD [73].



Figura 4-8 Proyecto de Navantia para Transporte Logístico con GNL
[73]

4.1.3 Biogás

La energía solar, eólica y la geotermia son de las energías renovables más conocidas y más empleadas en la actualidad, pero no son las únicas. El biogás está formado en su inmensa mayoría por metano y es obtenido a partir de residuos orgánicos, a través de la digestión anaerobia, un proceso en que la materia orgánica, en ausencia de oxígeno y mediante bacterias específicas se descompone en productos gaseosos (biogás) y digestato. El nombre de digestato se le da a la obtención del producto secundario del proceso que puede ser empleado para producir fertilizantes orgánicos.

El biogás es, por tanto, un combustible ecológico y está cogiendo cada vez más fuerza en el proceso de la transición ecológica. Resaltar que el biogás llegó a España en los años 50 a raíz de la influencia de publicaciones en Francia y Alemania que habían tenido éxito y estaban desarrollando un nuevo gas ecológico procedente de las granjas. Quedaría en el olvido ya que en España no se hizo hincapié en este tema debido a que no estaban claros sus resultados. No sería hasta 1973 y 1979, donde hubo una crisis energética donde despertó de nuevo el interés hacia la digestión anaerobia. Sería en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Barcelona donde se conseguiría en 1981 la primera planta de biogás en una granja de vacas produciendo energía eléctrica. Más tarde, en 1984 se contabilizarían hasta 25 plantas de biogás en España de las cuales 10 estaban destinadas a labores de investigación. A pesar de que aparentemente se obtuvo éxito en este sector, la gran mayoría de ellas no trabajaba eficientemente debido a que el diseño no era del todo correcto y presentaba deficiencias. Tenían problemas de mantenimiento ya que no se tenía el suficiente conocimiento para tratar con ellas y estas reparaciones cuando se hacían, ya eran demasiado tarde. Este estudio no prosperaría hasta 2007, cuando se promulga el RD 661/2007 en el cual se regula la actividad de la producción eléctrica. En 2008, se pone en marcha la primera planta de cerdos que estaba conectada a la red eléctrica en Lérida, con un potencial que comenzó en 191 kW ampliándose hasta 400 kW. A raíz de esta planta, se construirían por España con las mismas características. En 2014, estarían operativas 31 plantas de biogás en el sector agroganadero. En este mismo año, cambiaron las regulaciones en España sobre las energías renovables afectando negativamente sobre éstas. No hay indicios de que estas plantas cierren ya que el biogás tiene diferentes

usos tales como producción de energía, carburante, energía térmica, biometano, producción de vapor, etc [74].

4.1.3.1 Propiedades Principales del Biogás

Se trata de un gas renovable compuesto mayoritariamente por CH₄ (metano) entre un 50 y 70 % y CO₂ (dióxido de carbono). Cuenta además con pequeñas proporciones de otros gases como hidrogeno, nitrógeno y sulfuro de hidrogeno. De acuerdo con el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía en España es “la única energía renovable que puede usarse para cualquiera de las grandes aplicaciones energéticas: eléctrica, térmica y carburante”. Aprovecha las grandes cantidades de residuos ganaderos, lodos de depuradoras de agua y residuos domésticos. Convirtiendo así la basura en una fuente de energía evitando problemas de almacenamiento de estos desechos. En función del propósito al que esté destinado el biogás, deberán adoptarse diferentes técnicas para separar los compuestos no deseados en el proceso. Además, las operaciones que están destinadas a eliminar el CO₂ y obtener un gas parecido al gas natural se denominan mejoramiento del gas. El biometano es el biogás enriquecido en metano con proporciones parecidas al gas natural.

El poder calorífico del biogás está comprendido entre 17 y 34 MJ/m³ dependiendo de las proporciones del metano. Las características del gas que se obtenga, emplean el índice de Wobbe (IW), superior o inferior:

$$IW = \frac{PC}{\sqrt{\rho}}$$

PC es la potencia calorífica y ρ la densidad relativa del gas respecto del aire. Si la potencia introducida es la superior o la inferior, se obtendrán valores de IW proporcionales a PC. La regulación española exige que la calidad de un gas para ser distribuido en la red de gas natural implica valores de IW de entre 13,403 y 16,058 kWh/Nm³ (BOE, 2013).

Se expone a continuación la Tabla 4-3, donde se puede ver la relación entre el volumen de biogás y peso de biomasa dependiendo de su naturaleza, se puede obtener diferentes volúmenes [75].

Tipo de biomasa	L de biogás por kg
Estiércol de vacuno	10 - 34
Estiércol de cerdo	12 - 30
Estiércol de ovino	29 - 106
Estiércol de caprino	50 - 250
EDAR	100 - 300
Algas	80 - 290
Restos de comida	21 - 76

Tabla 4-3 Equivalencia volumen de biogás y cantidad de biomasa (elaboración propia basado en [75])

4.1.3.2 Obtención del biogás mediante digestión anaerobia

La digestión anaerobia es uno de los procesos que más éxito tienen con la reducción del efecto invernadero, extracción de energía de residuos orgánicos y mantenimiento y mejora del fertilizante ganadero. Para llevar a cabo su proceso necesita varias fases seguidas para la degradación del sustrato, que es la materia que necesitan los microorganismos, Figura 4-9 [76].

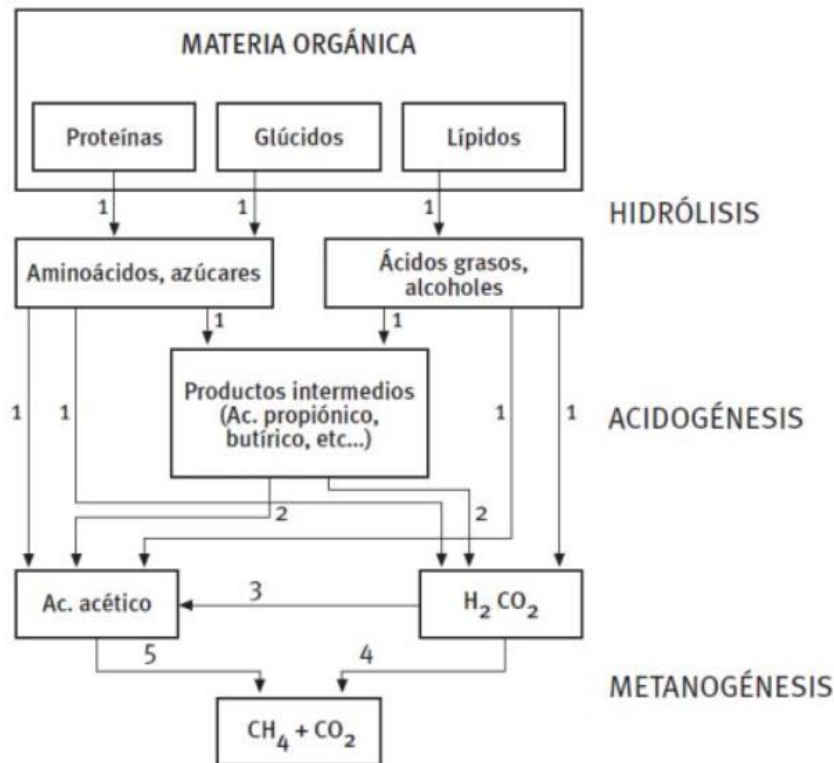


Figura 4-9 Principales Etapas en Digestión Anaerobia [76]

Estos microorganismos están caracterizados por tener diferentes velocidades y sensibilidad en el proceso. Por lo que habrá diferentes velocidades de reacción según el material con el que esté reaccionando, de este modo hay que conseguir el equilibrio en el proceso que evite acumulación de residuo que podría reducir el pH, siendo una consecuencia negativa para conseguir el equilibrio de las fases. Es decir, el inicio del proceso ha de ser de forma cuidadosa y lenta requiriendo meses.

La etapa más lenta es la que marca el ritmo de la digestión anaerobia. Con las bacterias acetogénicas y metanogénicas el proceso dura días. En sustancias donde haya partículas, el limitante se encuentra en la hidrólisis, que depende de la superficie de las partículas, este proceso hace que la digestión sea del orden de semanas. Para contrarrestar esto, habría que reducir el tamaño de las partículas o facilitar la solubilización (ultrasonido, tratamiento térmico, alta presión, etc.).

Para maximizar la producción del biogás y asegurar un proceso estable, durante la digestión anaerobia se pueden controlar tanto parámetros ambientales (Tabla 4-4) como operacionales (Tabla 4-5).

pH	Mantener la neutralidad
Alcalinidad	Evitar acidificación, superior a 1,5 g/L CaCO ₃

Potencial REDOX	Valores inferiores a -350V
Nutrientes	Crecimiento de organismos
Tóxicos e inhibidores	Se requiere lo mínimo e imprescindible

Tabla 4-4 Parámetros ambientales anaerobia (elaboración propia)

Temperatura	El crecimiento depende proporcionalmente de la T ^a , pero también la sensibilidad para el NH ₃ . De este modo se asegura la destrucción de patógenos.
Agitación	Energía que favorece la transferencia de sustrato para homogeneizar las concentraciones.
Tiempo retención	Cociente entre volumen y caudal de tratamiento.
Velocidad carga orgánica	Cantidad de materia orgánica introducida, depende de la instalación el valor óptimo.

Tabla 4-5 Parámetros operacionales anaerobia (elaboración propia)

Para producir biogás es necesario tener una planta específica, donde además de llevarse a cabo el proceso de digestión anaerobia se necesitan otras operaciones. En total se pueden distinguir cuatro etapas:

Es necesario tener una planta donde se pueda almacenar residuos y dejar trabajar a las bacterias en el proceso, una planta de Biogás específica o complejos para la gestión de residuos. Estos deben de tener las siguientes partes:

➤ Receptor:

Donde se recibe y queda almacenada los residuos orgánicos. En este espacio también iría colocado el residente. Cada una de las plantas trabajan con un tipo de sustrato definido sin poder trabajar con más de uno a la vez.

➤ Biodigestores:

Los residuos orgánicos pasan de ser sólidos a gas por medio del sustrato en cámaras oscuras sin oxígeno. Estos residuos están constantemente en movimiento y habitualmente en torno a 37°C. El sustrato queda durante un largo período en esta cámara, en torno a uno o dos meses. La planta puede ser continua o discontinua, lo que permite añadir o extraer sustrato para alcanzar el ritmo óptimo de trabajo en la planta.

➤ Almacenamiento:

Cuando el proceso finaliza, se obtienen dos productos: el biogás y el digestato.

➤ Obtención de energía:

Según el tipo de planta en cuestión, el biogás puede ser empleado de forma mecánica para mover vehículos o empleado en la red de gas del país.

En la Figura 4-10 se muestra un esquema simplificado del proceso de obtención del biogás

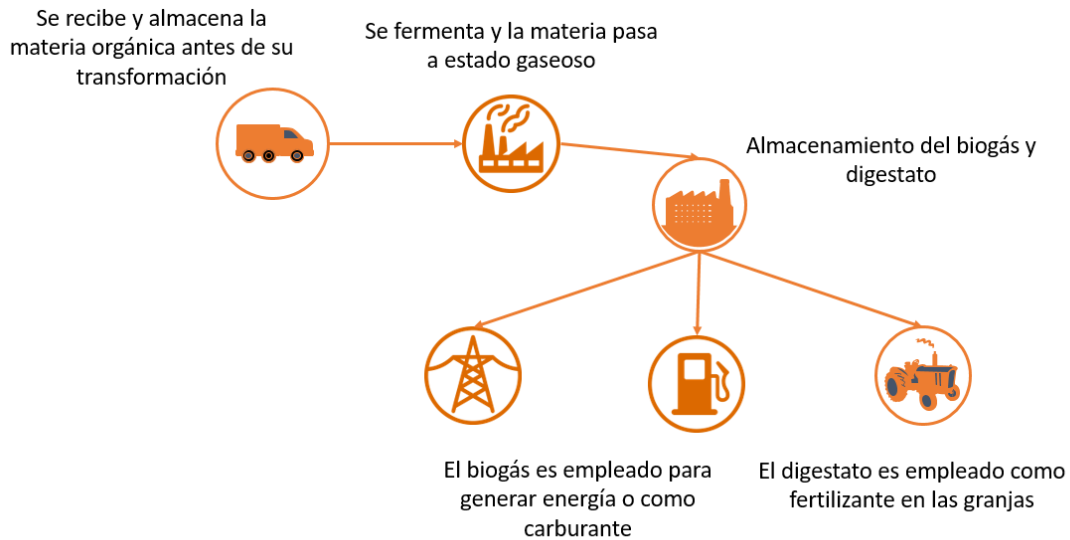


Figura 4-10 Esquema generalizado de obtención de biogás (elaboración propia)

4.1.3.3 Usos del Biogás

El biogás puede ser utilizado para diferentes fines y en función de estos variarán los requerimientos del sistema al que vaya ser destinado (electricidad, propulsión, agricultura). El uso directo es en una planta de calor o vapor en equipos de cogeneración eléctrica y térmica. La eficiencia depende de si el biogás puede ser empleado en su totalidad. Para evitar situaciones estacionales de poco uso energético, es recomendable el uso del biogás tratado a centros cercanos en consumo de energía térmica. En la Figura 4-11, se muestra los principales usos del biogás y su método de obtención [74].

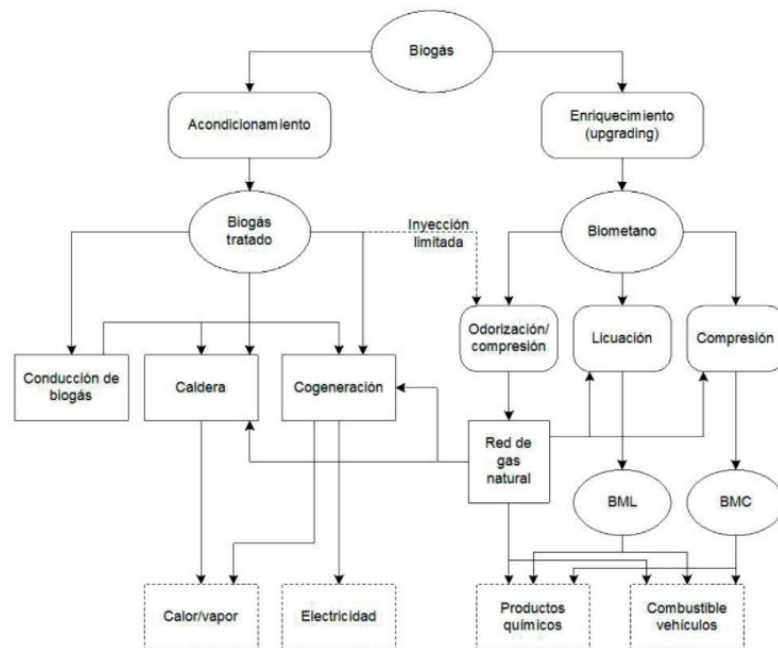


Figura 4-11 Usos y Tratamientos del Biogás [74]

Se analizará principalmente del uso de biogás como sistema propulsor. Ha ido creciendo en el tiempo llegando a la cifra de 9 millones de vehículos funcionando con gas natural en el mundo. La calidad del biometano es aproximadamente la misma que la del gas natural para este empleo.

El uso del biogás se complica un poco ya que la calidad de su composición no es muy alta. Pues contiene un volumen apreciable de CO₂, humedad y ácido sulfhídrico (H₂S). En consecuencia, es necesario una limpieza previa y una selección cuidadosa del motor. Existe variedad en el mercado de estos tipos de motores como de filtros, deshumidificadores, sistemas de recuperación y disipación de calor [77].

Los motores que funcionan con gas son muy similares a los motores de gasolina, la diferencia está en la admisión del combustible. Los motores a gas, la admisión se realiza con gas a presión regulada inyectando el gas directamente. La sustitución de biogás por gas vehicular es del 100%. Las cargas que se aplican, se recomienda que sean constantes para evitar problemas de regulación del motor y una ineficiente calidad de la energía.

➤ Obtención del biometano

Para su empleo como transporte, debe de estar depurado con una calidad similar al gas natural, esto se consigue de forma sencilla haciendo biometano. Se muestra el proceso de biogás a biometano en la Figura 4-12.

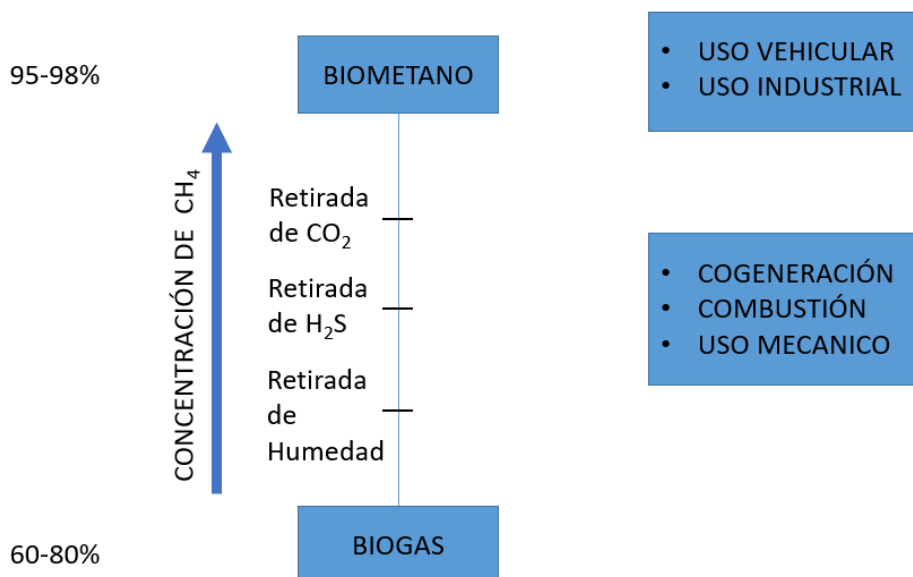


Figura 4-12 Proceso obtención biometano (elaboración propia)

En cuanto al uso del biogás como combustible para la propulsión, se requieren pasos adicionales. El primer paso de limpieza es insuficiente para lograr la cantidad de biometano requerido de acuerdo con las normas que regulan su calidad. Por lo que un segundo paso de purificación, con procesos adicionales destinados a ajustar concentraciones de los diversos componentes a los valores exigidos por las disposiciones legales de la calidad del biometano [78]. La venta de biometano que no cumpla estas regulaciones, está totalmente prohibida.

Enriquecimiento, es el nombre que se le da al proceso de aumentar la concentración de metano en el gas, obteniendo consecuentemente un mayor poder calorífico. Permitiendo así la sustitución del combustible, con este aumento de poder calorífico se obtienen varias ventajas. Menores costes de transporte por unidad de potencia pues la parte inerte del gas no se carga. Los costes de almacenamiento disminuyen debido al menor consumo de energía para la compresión y reducción de estructuras, ya que es posible obtener la misma cantidad de energía con menor volumen de gas. Esto se traduce en un combustible más denso en energía, reduciendo el tamaño y peso de almacenamiento del combustible y/o aumentar la autonomía del combustible.

La concentración mínima de metano debe de ser en torno a 90%, así la concentración de sustancias inertes es aproximadamente del 10% y la del CO₂ se obtendría en torno a un 3%. Como se puede ver, la

concentración de metano en biometano es uno de los parámetros más importantes [79]. Este parámetro influye en el coste del enriquecimiento siempre que cumpla con los requisitos de biometano.

Se representan a continuación las técnicas más comunes de enriquecimiento [78], en la Tabla 4-6 se ven de forma resumida:

- **Lavado con agua a presión:** Proceso de absorción en la que uno o más elementos de una mezcla gaseosa se disuelve en un líquido. El proceso tiene lugar en una columna llena de sólidos, aumentando el área de contacto entre el gas y el fluido favoreciendo la transferencia de masa. Esta separación se produce por la diferencia de solubilidad de los compuestos en el fluido absorbente, es eficaz en la eliminación de dióxido de carbono, ya que es más soluble que el metano. El biometano producido por esta técnica requiere de un secado fino posterior.
- **Absorción química con disolventes orgánicos:** El producto químico de este compuesto por aminas que absorben y reaccionan químicamente con el dióxido de carbono. La selectividad en la reacción permite que las pérdidas de metano sean muy pequeñas, menor al 0,1%. La ventaja de este proceso reside en la pureza del biometano obtenido, por encima del 99%. El problema está en que es complicado la recuperación del solvente, que requiere de una gran cantidad de energía térmica si hay H₂S.
- **Absorción física con disolventes orgánicos:** Se realiza mediante lavado con un fluido no reactivo, similar al proceso de agua a presión, absorbiendo selectivamente el CO₂. La eliminación del agua y SO_x se puede realizar con hidrogeno. Sin embargo, la viabilidad resulta mayor cuando el biogás se trata previamente para eliminar las impurezas.
- **Adsorción modulada por presión:** Aprovecha la reversibilidad del proceso de adsorción selectiva de CO₂ en materiales como el carbón activo. Se requiere de una limpieza previa ya que el sulfuro de hidrogeno puede ser adsorbido irreversiblemente sobre los materiales, inutilizándolos.
- **Separación por membrana:** Se basa en las diferentes permeabilidades del material polimérico en relación a los componentes del biogás. La membrana es considerada “semipermeable” reteniendo algunas moléculas mientras que otros lo atraviesan. Esta técnica permite alcanzar niveles de metano en el producto superior al 80%, para mejorar este dato, un proceso de múltiples etapas, es capaz de alcanzar una pureza superior al 96%.

Parámetro	Lavado con agua	Absorción química	Absorción física	Adsorción con modulación de presión	Membranas
Pérdida CH ₄	0.5-2%	<0,1%	1-4%	1-8%	1-8%
Consumo electricidad	Alto-muy alto	Bajo	Alto	Alto	Alto
Demanda Térmica	-	Alto	Bajo	-	-
Pureza CH ₄	96-99%	>99%	>96%	>96%	80-99%

Tabla 4-6 Comparación enriquecimiento biogás (elaboración propia)

El biometano tiene variedad de usos, ya sea en motores de combustión o turbinas de gas. No obstante, es necesario identificar los requerimientos del caudal, así como la composición y potencia del

poder calorífico del biogás a utilizar. Las propiedades físicas del biometano inyectado y el gas natural existente han de ser equivalentes. Este ajuste se puede realizar añadiendo aire o gas licuado de petróleo, siendo una mezcla de propano y butano. Actualmente y por razones económicas, el biometano comprimido es el más utilizado [80]. En España, existen 6 plantas de biogás que producen biometano específicamente en pleno funcionamiento, 29 en construcción, 8 plantas en proyecto y 10 plantas piloto, como se puede ver en la Figura 4-13.



Figura 4-13 Plantas de biometano en España 2022 [80]

En las siguientes Figura 4-14, Figura 4-15 y Tabla 4-7, se representa los números de plantas que producen los diferentes sectores para la obtención de biometano como su producción desde la actualidad hasta el año 2024.

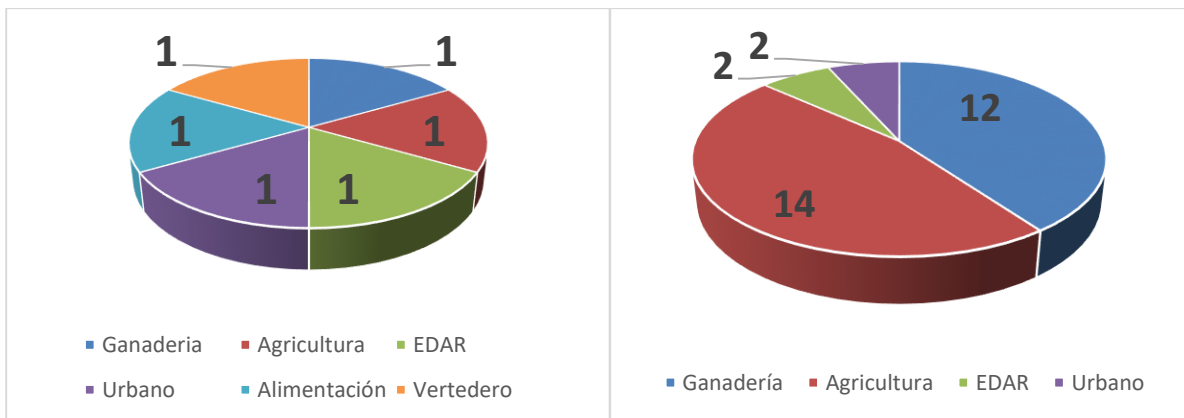


Figura 4-14 Distribución plantas de biometano en 2022 (izquierda) en 2023 (derecha) (elaboración propia)

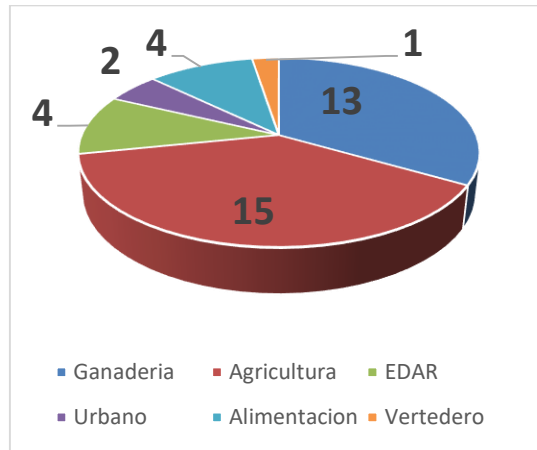


Figura 4-15 Distribución plantas biometano previstas en 2024 (elaboración propia)

Origen	Cantidad de plantas		Producción al año (GWh/año) para 2024
Agricultura	15	37,5%	741,4
Ganadería	14	35%	692
Vertedero	4	10%	1977,7
Alimentación	4	10%	178
EDAR	2	5%	97,5
Urbano	1	2,5%	70,4
Total	40		1977

Tabla 4-7 Distribución de plantas y producción de biometano (elaboración propia)

Se puede ver que España está apostando por este combustible y el empleo de gas como combustible del mañana, se puede ver que el GNL y el biometano están siendo los principales culpables del paso de los combustibles fósiles a las energías renovables. Además, el IDAE (Instituto para la Diversión y Ahorro de Energía), publicó los proyectos que fueron seleccionados para recibir los fondos de FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional) donde 19 de estas plantas están apoyadas por estos fondos [81].

El análisis del ciclo de vida (ACV) es una herramienta que ayuda a analizar los aspectos ambientales y los impactos asociados de un determinado producto, abarcando todas las etapas de su vida, desde la extracción hasta la eliminación del producto restante. El ACV evalúa a través de las etapas de la vida del producto de manera independiente. Tanto el biogás para la generación de electricidad como el biometano como combustible, tienen una excelente ventaja ambiental: es el único con una huella de carbono negativa en su ACV. Esto puede resultar de gran utilidad para contrarrestar los efectos de los gases de efecto invernadero. Para comparar con otros combustibles, la Universidad de California realiza un análisis anual de la huella de carbono de los diferentes combustibles [82], estos datos son proporcionados por más de 600 productores de diferentes países del mundo. Los valores se muestran en la Tabla 4-8.

De forma similar, se realizó un estudio por la Asociación Brasileña de Empresas de Limpieza Pública y Residuos Especiales, que muestra el potencial de reducción de emisiones del biometano. Alcanzando la cifra de 29 millones de toneladas de CO₂ por año [83]. En la Figura 4-16 se muestra el rango de emisiones de CO₂, donde se puede ver la enorme ventaja del biometano en cuanto a los valores mínimos de emisión.

Combustible	gCO ₂ equivalente/MJ		Origen
	Mínimo	Máximo	
Diésel	100,45	100,45	Valor medio basado en crudo suministrado refinерías en California
Gasolina	100,82	100,82	
Gas Natural	51,74	93,59	Gas Natural americano
Etanol	7,18	86,22	Maíz, remolacha, caña de azúcar, paja
Biometano	-272,97	78	Estiércol, basura orgánica, alimentos

Figura 4-16 Comparación de emisiones de CO₂ (elaboración propia)

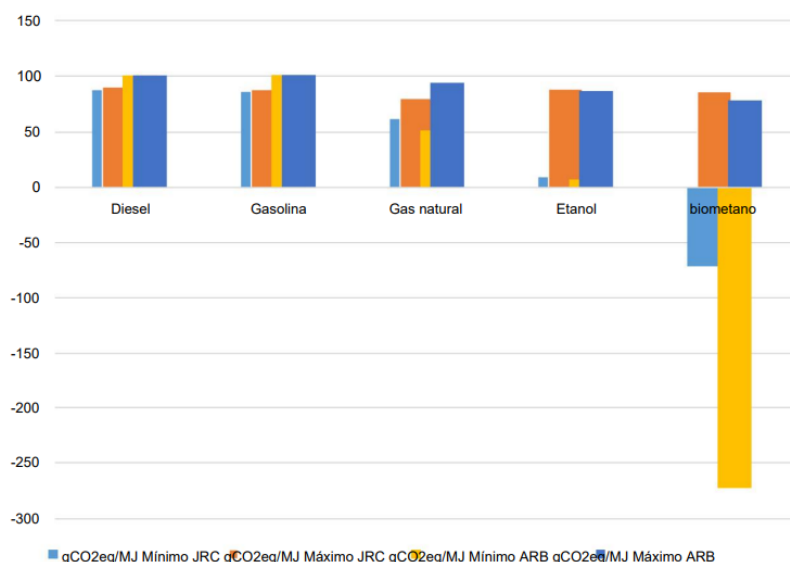


Tabla 4-8 Emisiones de CO₂ diferentes combustibles (elaboración propia)

Los costes involucrados en el proceso de obtención del biometano tienen como parámetro la eficiencia energética, eficiencia de remoción y costos de inversión. Los costes de operación están influenciados por el consumo de energía del proceso, siendo dependiente de la tecnología utilizada y la mano de obra. La recuperación de la energía es otro factor a tener en cuenta, una planta con recuperación de energía tiene costos operativos más bajos. También es de vital importancia el precio final del producto, por lo que es importante la reducción de costos específicos, es decir, por biometano producido. Las principales técnicas son similares entre sí, como se puede ver en la Figura 4-17.

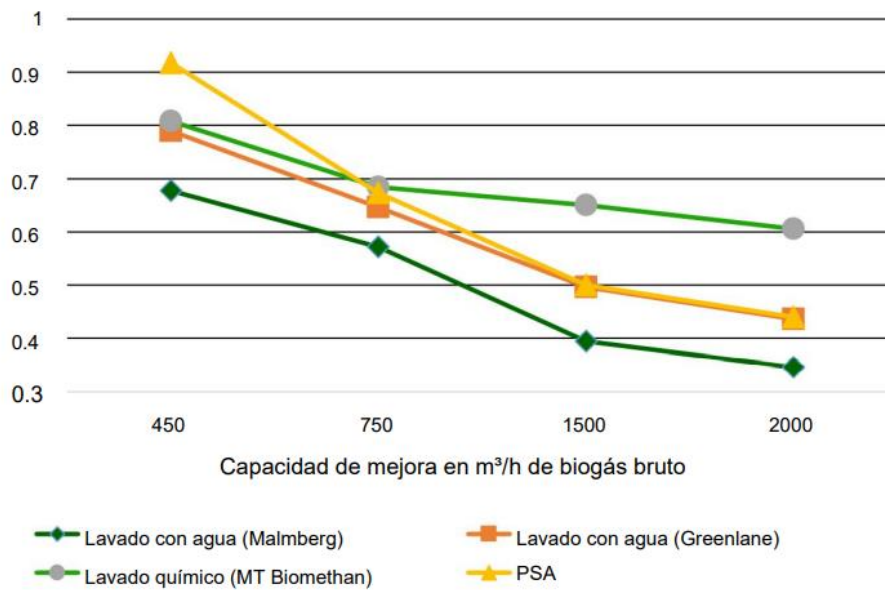


Figura 4-17 Costos específicos de mejoramiento de biogás (elaboración propia)

Evaluando los costes involucrados en la producción de biometano. Considerando una producción de biogás bruto de 5000 m³/h con un valor calorífico de 40 MJ/m³. Pueden influir en el precio la disponibilidad de proveedores locales, mantenimientos ambientales y de salud.

Actualmente, el precio del biometano está estimado a día 22 de febrero de 2022 a partir de 55€/MWh, siendo un 30% más barato que el precio actual del gas natural (80€/MWh) [84]. En Europa, se está incentivando el biometano como la transición hacia el cambio de los combustibles fósiles a los combustibles renovables, este gas podría alcanzar el 10% de la demanda total europea (34 billones de m³). Este potencial puede alcanzar el 30-40% de la demanda en Europa de gas, lo que se traduce en una menor dependencia en los países exteriores a las UE y depender de sí mismo, ya que Europa solo produce un 15% de su demanda de gas. Añadir también el conflicto entre Rusia, el mayor proveedor de gas (Gazprom) con Ucrania, pueden cortar el suministro de gas a Europa. Este suministro de gas no necesita de un gasto extra para su distribución, pues el actual sistema de tuberías de gas europeo funciona en las mismas condiciones que para el biometano. De acuerdo con el CEO de la EBA (Asociación Europea del Biogás) Harmen Dekker: “Está creciendo un fuerte desarrollo de instalaciones de biometano en toda Europa, para mitigar el cambio climático, reducir la dependencia de suministros externos y hacer frente al precio del gas natural”.

4.1.3.4 Propulsión de buques mediante biometano

Un ejemplo de buque propulsado mediante biogás, sería el “Hurtigruten” (Figura 4-18) de Noruega que emplea como combustible biometano al 100%. Llegando a un acuerdo de más de 7 años desde el año 2019. De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía (AIE), el biogás que emplea como materia prima los residuos, es un 179% renovable. Esta implementación suplirá a los motores convencionales por motores de gas y baterías de gran tamaño [85].



Figura 4-18 “Hurtigruten” [85]

La mayor naviera del mundo “Maersk”, anunció en el año 2021 la inversión de 1.200 millones de euros para la adquisición de 8 buques que funcionan con combustible fósil o biometano, apostando por la descarbonización y sirviendo de precedente al resto del sector [86]. El objetivo de 0 emisiones para 2050 no es fácil y se tienen que tomar decisiones importantes para la consecución de este objetivo. La empresa anuncia que no hay suficiente biometano para abastecer a sus futuros 8 buques en su totalidad, pero la subida de precio del diésel y la apuesta europea por el desarrollo del biometano, hace que no sea una inversión muy arriesgada. Con este movimiento se pretende que todas las empresas con poder adquisitivo inviertan en este movimiento. Empresas como Amazon, H&M y Microsoft, en las cuales sus mercancías son transportadas por el sector marítimo, han apoyado la decisión de “Maersk” para reducir su huella de carbono. La naviera francesa CMA-CGM también se suma a este movimiento con 12.000 toneladas de biometano que es equivalente a un año entero de dos buques mercantes transoceánicos [87].

La empresa Balearia también hace hincapié con el biometano, con el fast ferry “Eleanor Roosevelt” mostrado en la Figura 4-19, consiguiendo el primer trayecto con combustible 100% ecológico entre Barcelona y Menorca. Combustible suministrado por la empresa Axpo Iberia, primer comercializador de biometano en España [88] (Figura 4-19). A través del proyecto Bio2Bunker, se procederá a repostajes en la mar con barcas que emplean biometano, estas barcas dan la posibilidad de repostar en la mar sin la necesidad de entrar a puerto con la contaminación que esto conlleva. Este proyecto recibirá una subvención de 11 millones de € a través del MCE (Mecanismo Conectar Europa) en Bélgica, Países Bajos y Alemania (Figura 4-19) [89].



Figura 4-19 Ferry con biometano “Eleanor Roosevelt” [88] a la izquierda y barcaza de combustible Bio2Bunker [89] a la derecha

En la Tabla 4-9 se pueden ver las ventajas y desventajas del uso de biometano de manera resumida.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> + Alternativa 100% ecológica a los combustibles fósiles + Está probado + Inversiones de grandes empresas + Subvenciones de la UE + Aprovechamiento de la biomasa + Se produce en el mismo país + Distribución por la misma red de gas natural + En un futuro no lejano, será más barato que el diésel debido a su escasez. + Mejora en sistema de gestión de residuos + Gran reducción del CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> - Control de la temperatura y de la presión - Nuevos diseños de los tanques de almacenamiento - Adaptación de los motores - Más caro actualmente que los combustibles fósiles - Accesible solo las zonas rurales - Puede contener impurezas que dañen los motores - Campo no muy desarrollado

Tabla 4-9 Ventajas y desventajas del biometano (elaboración propia)

4.2 Técnicas de reducción de emisiones

A partir del año 2020, cuando el requerimiento de azufre se estableció a un 0,5%, y del 0,1% en las ECA's (Figura 2-3), alrededor de 70.000 barcos se ven afectados por este requerimiento. Por lo que tener un sistema de tratamiento de los gases de escape que consiga reducir el contenido de azufre, es de vital importancia para poder navegar por cualquier zona.

Actualmente, existen una gran variedad en el campo de reducción de gases contaminantes en la exhaustación de los sistemas de propulsión [90]. Se clasifican del siguiente modo:

- ✓ Pre-tratamiento: Se evita la formación de compuestos perjudiciales como pueden ser SO₂, NO₂ y CO₂.
- ✓ Post-tratamiento: Evitar el vertido directo de los gases a la atmosfera.

A continuación, se expondrán diferentes técnicas empleadas haciendo especial hincapié en los scrubbers (o lavadores) ya que es la técnica que resulta más económica y está más desarrollada.

4.2.1 Pretratamiento:

Su objetivo es evitar la formación de gases tóxicos y perjudiciales antes de su formación. Cabe destacar que en estos procesos resulta más sencillo la eliminación de los compuestos del nitrógeno, por lo que, si se quieren eliminar los óxidos de azufre se debe de hacer antes de insertar el combustible, como está explicado en 4.1.2. Es más efectivo y económico refinar combustibles de calidad antes que combustibles bajos en contenido de azufre. Existen distintos tipos de biocarburantes que consiguen este objetivo, como puede ser el biodiesel, bioetanol o incluso el biogás. Donde la reducción de azufre y carbono es muy notable.

Estos procesos están más enfocados en motores de menor porte como un vehículo terrestre, ya que el coste de manipulación y rediseño del bloque motor es menor que en un buque, resulta más sencillo modificar las válvulas de admisión en estos motores que en mercantes con motores lentos de dos tiempos.

4.2.1.1 Recirculación de gases (EGR)

Elimina el NO_2 y NO recirculando los gases al colector de admisión descendiendo el oxígeno de la etapa de admisión y como consecuencia, reducir la temperatura en la cámara de combustión, consiguiendo la reducción de los óxidos de nitrógeno. Los NO_x aparecen cuando hay abundante oxígeno y la temperatura es de 25°C (ambiente). Es común emplear este sistema junto con un catalizador u otro sistema que funciona del mismo modo [91]. En la Figura 4-20 se muestra un esquema resumido.

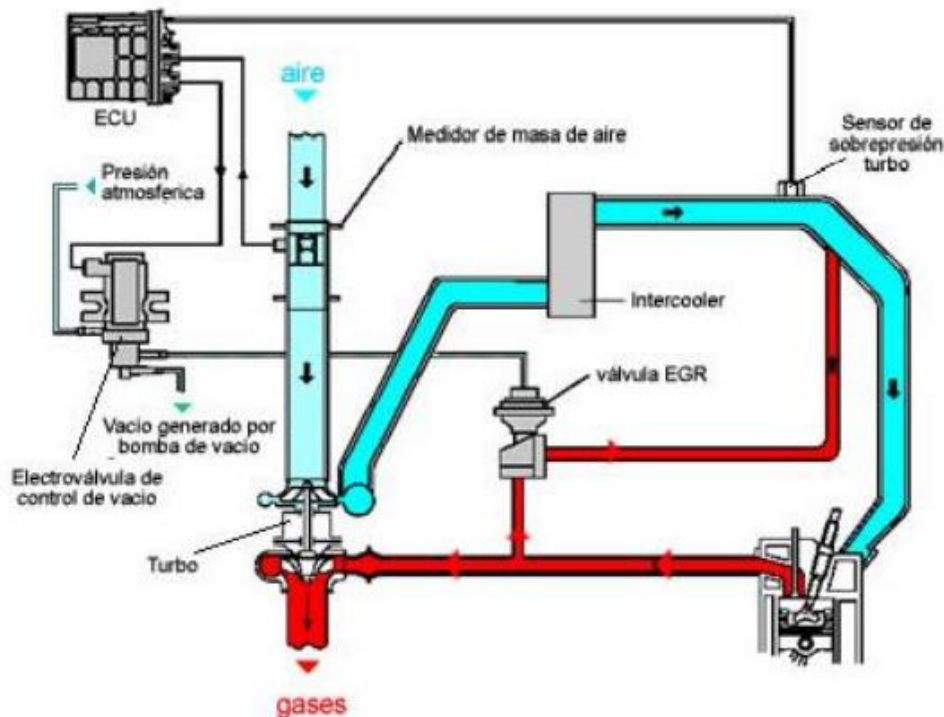


Figura 4-20 Esquema EGR Recirculación de Gases [91]

El funcionamiento consiste en: controlar el aire de admisión, el combustible inyectado, la temperatura y presión atmosférica. En función de estos valores, se accionará la válvula EGR para la recirculación de gases de escape. Puede ser activada de forma neumática o a distancia eléctricamente.

Este sistema reduce el consumo en revoluciones medias y altas. Esto puede ser perjudicial si se emplea para revoluciones bajas, aumenta el consumo y reduce la potencia entregada.

Es usado principalmente en vehículos terrestres, es cierto que existen estudios relacionados con implementar este dispositivo en el transporte marítimo, pero requiere de modificaciones en el motor creando una recirculación de gases y está destinado principalmente para motores con un régimen de revoluciones alto o incluso medio, y en los buques de la Armada Española no se emplea este tipo de motores. Además de esto, cuanto más porcentaje de nitrógeno se quiere eliminar, más consumo de combustible conlleva, encareciendo enormemente su empleo [92]. Es por esto que no se ha planteado como posible propuesta.

4.2.1.2 Inyección directa de agua en la cámara de combustión (DWI)

Se inyecta agua a alta presión en la cámara de combustión antes de que se inyecte combustible para enfriar el espacio de la cámara de combustión. Se consigue reducir entre un 50% y un 60% aunque se aumente el consumo de combustible de forma ligera.

En la Figura 4-21 se puede observar la cantidad que se genera de NO_x con DWI o sin DWI, en la figura en verde se ve que no existen apenas sustancias NO_x y en cambio en la zona roja sí que existen. [93].

Para este sistema se necesitaría rediseñar el sistema de inyección, pues se necesita agua y combustible a la vez. Además, la inyección de agua tiene que ser de forma controlada en función de si se necesita más o menos cantidad.

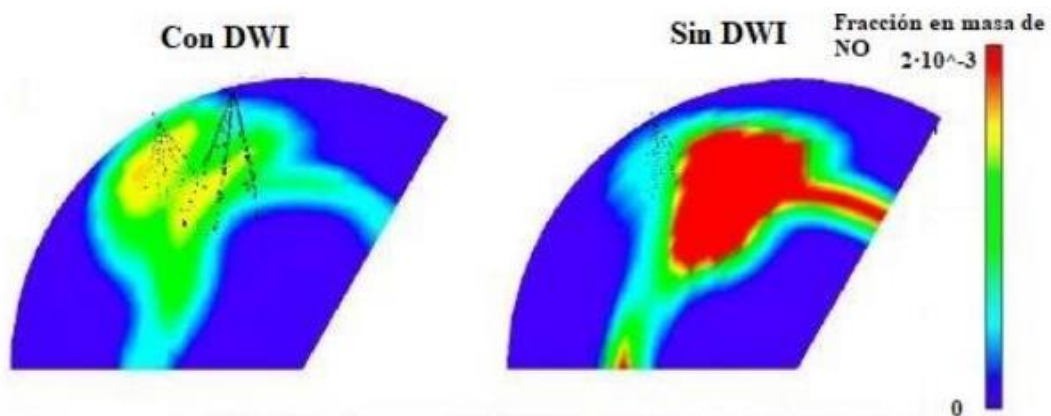


Figura 4-21 Comparación con y sin DWI [93]

La problemática de este sistema reside en la modificación en la admisión del combustible para añadir a su vez agua. Además de que requiere de combustibles que tenga un porcentaje de azufre bajo (1,5%), el azufre puede reaccionar con el agua y el oxígeno produciendo ácido sulfúrico dañando el motor por su elevada corrosión. Además, el motor debe de trabajar por encima del 40% de carga para reducir emisiones y evitar vibraciones que se pueden aparecer, resultando en daños terminales para el bloque motor [94]. Por estos motivos no se ha considerado este sistema como propuesta, pues existe la posibilidad de que el precio del combustible con bajo azufre aumente y no se pueda emplear un combustible pesado por el exceso de azufre.

4.2.1.3 Técnicas de desulfuración de combustibles

La hidrodesulfuración (HDS) ha sido una parte integral de las operaciones de refinado. La nueva normativa sobre la regulación del azufre, impone un reto técnico y operativo cada vez mayor. Para

producir diésel a un nivel muy bajo en azufre, deben adoptarse técnicas de HDS. Esto requiere que el HDS sea en las condiciones más severas (temperatura muy alta, mayor presión de hidrógeno y catalizadores más activos en un mayor tiempo). Pero el uso de HDS de manera profunda tiene efectos negativos, como la reducción de la vida útil del catalizador, un mayor consumo del hidrógeno y una mayor pérdida del rendimiento, esto se traduce en mayores costes de explotación.

La desulfuración oxidativa ha atraído mucha atención. Se sabe que los compuestos de azufre oxidados (como las sulfonas o sulfóxidos) son más polares que los sulfuros. Esto permite la eliminación selectiva de los compuestos de azufre de los hidrocarburos mediante un proceso de combinado de oxidación selectiva y extracción con disolventes. Este proceso depende de la cinética y la selectividad de la oxidación de los compuestos orgánicos del azufre a sulfonas. El procedimiento más común para preparar sulfonas es por oxidación de sulfuros, generalmente mediante una reacción con un ácido peroxicarboxílico generado in situ por peróxido de hidrógeno y ácido carboxílico. Compuestos de azufre con menos nucleofilia, como el dibenzotiofeno (DBT), pueden ser oxidados bajo condiciones suaves a sulfonas a altos rendimientos. No obstante, el tiempo de reacción prolongado y la excesiva descomposición del peróxido de hidrógeno lo que hacen de este proceso poco practicable a escala industrial.

El uso de ultrasonidos puede mejorar significativamente la eficiencia de la reacción en condiciones de transferencia de fase. La mayoría de agentes de esta fase, son especies tensioactivas que reducen la tensión superficial y permiten la fácil formación bajo ultrasonidos. Este proceso mejora el área intermedia líquido-líquido a través de la emulsión, lo que es importante para películas viscosas que contienen burbujas de gas en las películas. Oscilan por el ultrasonido y mediante la corriente acústica, arrastran parte de la película [95].

A través del proceso de desulfuración oxidada por ultrasonido asistido (UAOD), se ayuda a limpiar el azufre formado con peróxido de hidrógeno. Se pueden dar varias reacciones con la reducción del peróxido de hidrógeno: descomposición térmica de peróxido de hidrógeno a oxígeno molecular y agua; escisión homolítica por ultrasonidos para formar un radical libre de hidróxilo; oxidación del catalizador metálico para formar su complejo peroxometal y transferencia directa a la fase orgánica.

Se puede ver en la siguiente Tabla 4-10, 3 combustibles diésel: el primero con 0.7744% azufre/L (A), el segundo con 0.3011% azufre/L (B) y el tercero con 0.1867% azufre/L (C). Tras un proceso de enfriamiento, se forman 3 capas: la superior con diésel oxidado, la central con una capa acuosa y la inferior de residuo. La mezcla de diésel con solución acuosa de peróxido de hidrógeno, forma una emulsión ultrafina durante el ultrasonido. El residuo es inferior al 1% del diésel y contiene alrededor del 2% de azufre en peso. En este proceso se pueden obtener extracciones de azufre de un 99%, en tan solo minutos. En la Tabla 4-10 se puede ver la eficacia del proceso.

	Tiempo ultrasonido	Contenido de azufre (%)			Azufre extraído (%)	Diésel recuperado (%)
		Original	Después de oxidación	Después de la extracción		
Diésel A	18	0,7744	0,7545	0,0142	98,2	82,8
Diésel B	10	0,3011	0,2696	0,0039	98,7	87,2
Diésel C	10	0,1867	0,1670	0,0012	99,4	85,5

Tabla 4-10 Eficiencia y recuperación de la desulfuración con UAOD (elaboración propia basado en [95])

El cromatograma de la Figura 4-22, muestra la distribución y estructura molecular del azufre en la muestra de diésel original. En la Figura 4-23, se compara los cromatogramas del diésel original, diésel oxidado y el diésel desulfurado durante el proceso.

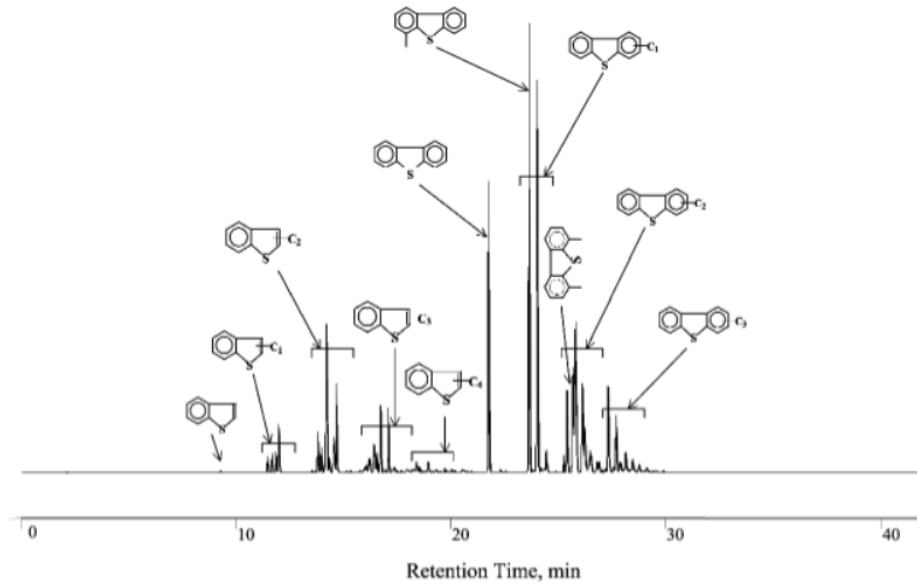


Figura 4-22 Distribución de Estructuras Moleculares de Azufre en Diésel Convencional con la Muestra Diésel C (0,1867%azufre/L) [95]

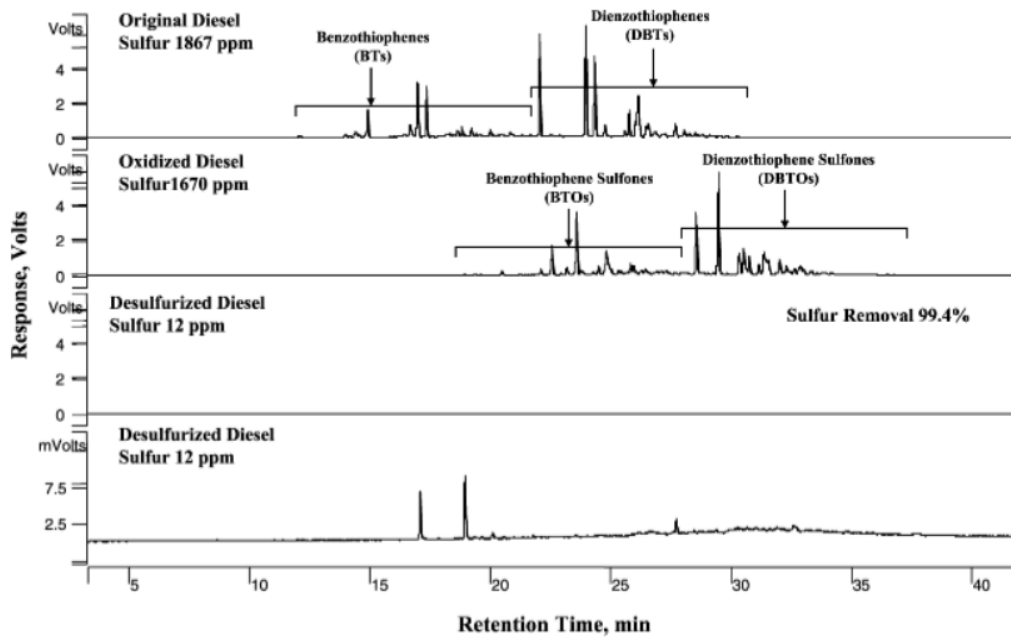


Figura 4-23 Cromatogramas del diésel original, diésel oxidado y diésel desulfurado [95]

A continuación, se presentan en la Tabla 4-11 las principales ventajas y desventajas de este proceso.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> + Dibenzotiofenos oxidados con baja T^a y presión + No requiere hidrógeno caro + Alta velocidad reacción + Con hidrotatamieto mejora producción combustible con nivel de azufre bajo/medio + 98% desulfuración + Económico + Posibilidad instalar a bordo + Seguro de operar 	<ul style="list-style-type: none"> X Datos confusos y necesidad de conocimientos para su entendimiento X Probabilidad de datos erróneos. X En presencia de gases, no realiza buenas medidas. X En grandes cantidades, se necesita un control de la T^a y presión X Genera radicales libres

Tabla 4-11 Ventajas y desventajas de desulfuración con ultrasonido (elaboración propia)

Se ha contactado con la empresa Hielscher Ultrasonics para ver el coste de adquisición de este modelo de ultrasonido, el dispositivo (UIP16000) de tiene 16.000 W de potencia ultrasónica [96]. Combina una gran potencia con una huella mínima. Capacidad de 500 a 1500 L/hora de combustible según el aporte de energía aplicada a la mezcla de gasóleo y agente oxidante. La instalación y puesta en marcha es sencilla, solo se necesita de tomas de entrada, de corriente y de refrigeración. A través de la ruta oxidativa (DBTO), consigue la desulfuración aumentando la eficiencia del proceso y reduciendo el tiempo de reacción. El proceso está explicado en la Figura 4-24.

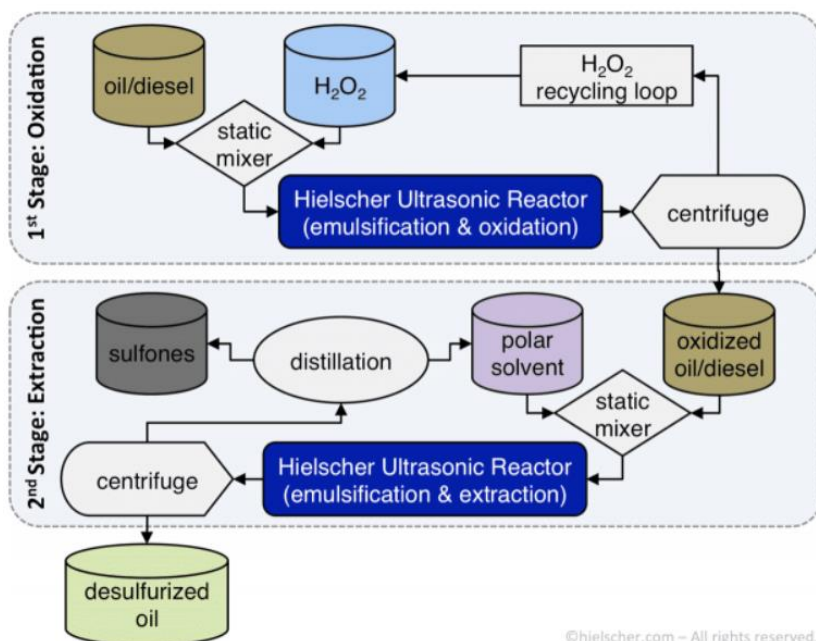


Figura 4-24 Desulfuración oxidativa con UIP16000 [96]

4.2.2 Post-tratamiento

Son técnicas empleadas en el proceso de escape de los gases del motor para eliminar las sustancias que salen por este mismo, es decir, filtrar y eliminar las partículas contaminantes antes de que el proceso de exhaustación llegue al aire. De este modo no habría que rediseñar los componentes internos del motor, sino solo modificar la salida de humos del sistema propulsor para conseguir el objetivo.

4.2.2.1 Reducción Catalítica Selectiva (SCR)

Es el único proceso que es capaz de tratar los gases de escape y cumplir la normativa a nivel 3 de la Tabla 2-1 de acuerdo con las emisiones NO_x [97]. Estos catalizadores se han introducido en los motores navales diésel que son antiguos para que puedan seguir navegando sin tener que cambiar la ruta. En la Figura 4-25, se muestra un esquema sintetizado de un SCR [98].



Figura 4-25 Esquema Reducción Catalítica Selectiva [98]

Durante este proceso, el catalizador adsorbe los gases de escape con un agente reductor (comúnmente es urea o amoníaco) aunque también existen con hidrocarburos. Destacar que tienen una vida operativa dependiendo de si se utiliza carbón (la vida útil oscila entre 6 y 10 años) o si se utiliza fueloil o gas (la vida útil es entre 8 y 12 años, lo que aumenta si se compara con el carbón) [99].

Uno de los problemas que más frecuente este dispositivo es que, aunque se haya agotado el agente reductor de la contaminación, el motor va a seguir funcionando a su régimen normal, por lo que no se lograría el objetivo MARPOL.

4.2.2.2 Scrubber (Lavador de gases)

Cada vez, los scrubbers están teniendo más importancia para reducir la contaminación y es un complemento indispensable para los buques que quieran reducir las emisiones de azufre. Se puede utilizar combustibles pesados que tengan contenido de azufre (HSFO) para propulsar el buque siempre y cuando se esté empleando un scrubber para eliminar los compuestos de azufre en la salida de este.

Este dispositivo es un sistema de depuración de emisiones atmosféricas. Tiene forma cilíndrica que, mediante un líquido, neutraliza los componentes contaminantes y nocivos. El líquido puede ser agua, un reactivo químico o una mezcla de ambos, hay que tener en cuenta que los componentes del nitrógeno pueden ser absorbidos en un medio ácido y los componentes del azufre mediante alguna sustancia alcalina u oxidante [100]. Existen componentes que son solubles al agua y no se necesita de una mayor complejidad para retenerlos. De este modo se filtran principalmente los SO_x y las PM, permitiendo emisiones de un gas limpio.

En la Figura 4-26 se muestra un esquema simplificado de un scrubber, este dispositivo es similar al de una torre de lavado de gases de escape. Existen dos modelos: sistema abierto o mojado (open loop) y el sistema cerrado o seco (closed loop).

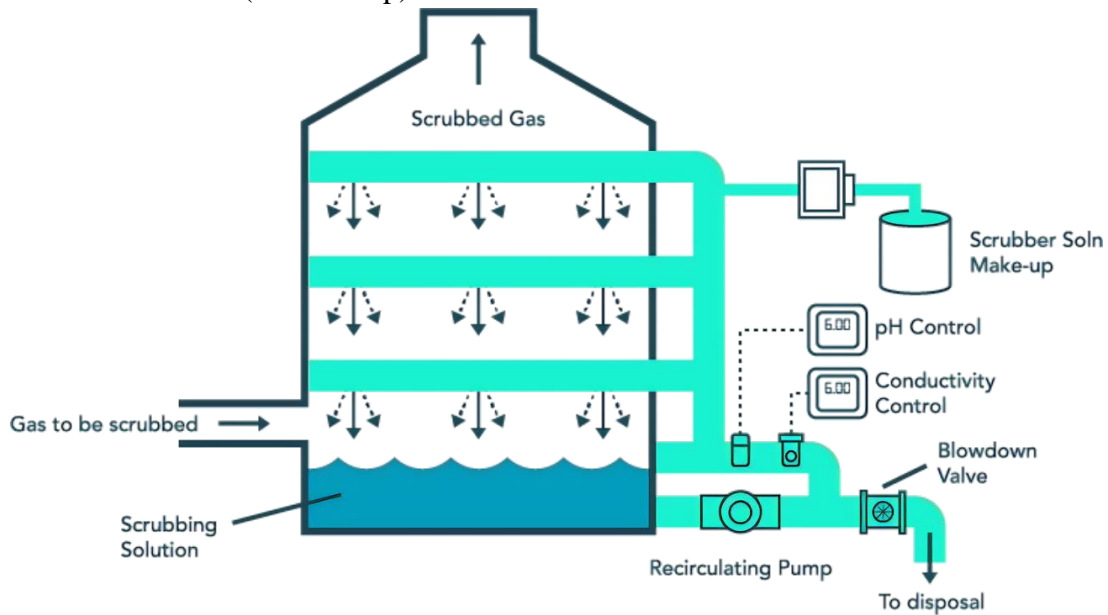


Figura 4-26 Esquema Scrubber [138]

El sistema abierto emplea agua del mar para eliminar el óxido de azufre en tres fases distintas a lo largo del escape de exhaustación. Junto con la alcalinidad del agua de mar, neutraliza el SO_2 sin necesidad de ninguna sustancia química a mayores. Esta misma agua es tratada y vertida al mar, hay que tener en cuenta donde se está vertiendo porque existen zonas con restricciones de vertido. Esta torre de lavado está diseñada para de pulverización del agua están diseñadas con este fin [101]. En la Figura 4- se muestra un esquema de un scrubber de sistema abierto.

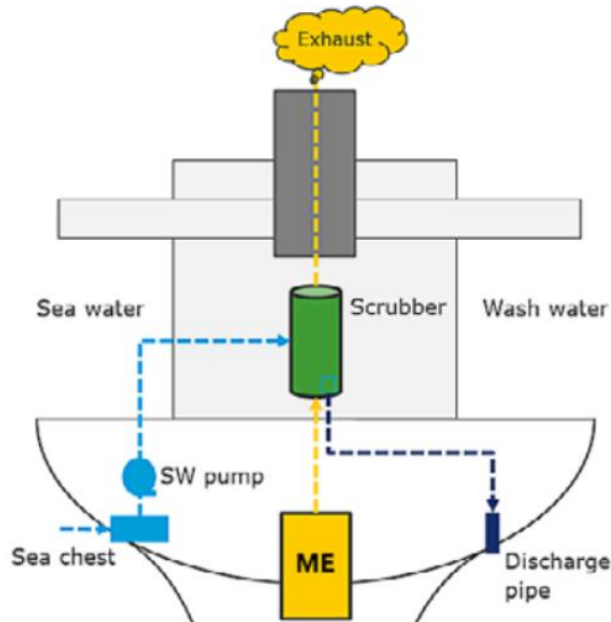


Figura 4-27 Scrubber de Sistema Abierto [101]

En el sistema cerrado, el agua solo circula por el conducto de lavado y también utiliza agentes en forma seca como la piedra caliza. Es necesario el uso de compuesto como el hidróxido de sodio (NaOH) para controlar la reacción. El agua que se emplea, es bombeada desde el tanque que pasa por el enfriador hasta la parte más elevada del scrubber y también la parte media para aumentar la eficiencia del

dispositivo. También se emplea el agua técnica para compensar la evaporización y el agua de lavado drenada. Una parte del agua tratada se drena y se trata con productos químicos o centrifugación, el restante pasa a un tanque de retención y se vierte cuando está permitido. Los lodos se transfieren al tanque de lodos. Los resultados son similares al sistema abierto. En la Figura 4-, se muestra un esquema de un scrubber cerrado.

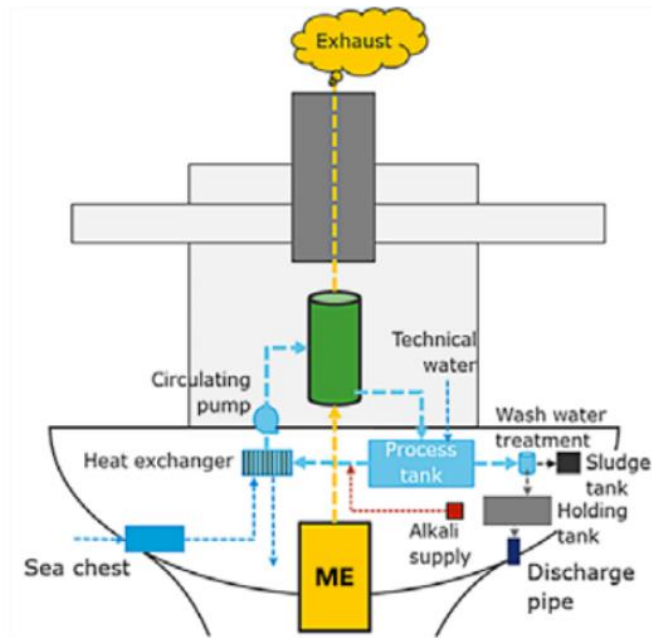


Figura 4-28 Scrubber de Sistema Cerrado [101]

Resaltar que existen sistemas híbridos que combinan las ventajas de ambos, por lo que permite decidir donde se drena el vertido de las aguas residuales del scrubber si directamente al mar o se almacena en el tanque destinado a ello, obteniendo una mayor flexibilidad en todas las áreas. La siguiente Tabla 4-12 se muestra a modo de resumen de lo explicado anteriormente.

TIPO DE SCRUBBER	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ABIERTO O MOJADO	+ Pocos componentes + Emplea el agua de mar, no requiere de agentes químicos	- No está permitido en algunas zonas - No se puede emplear en aguas dulces
CERRRADO O SECO	+ Flexibilidad + Puede operar en todas las áreas	- Mayor coste - Constante suministros de agentes alcalinos (NaOH)
HIBRIDO	+ Combina ambos tipos + Poco mantenimiento + Mayor tolerancia	- Mayor complejidad - Concentración de sustancias corrosivas

Tabla 4-12 Ventajas y desventajas de los tipos de scrubber (elaboración propia)

Los scrubbers fueron los primeros sistemas de tratamiento de gases, en buques con sistemas de propulsión de gas y diésel. Consiguen el objetivo de no contaminar más de un 0,5% de azufre al medio impuesto desde 2020. Este dispositivo fue aprobado por el IMO a bordo de los buques para cumplir con el anexo VI del Convenio MARPOL [102] . Los países donde pertenezcan los buques con este sistema

son responsables de que el sistema de tratamiento de gases funcione correctamente a través de los medios portuarios. Si no funciona de manera adecuada, los servicios de los puertos deben de ser responsables de sancionar de manera correcta esta situación.

Hay que tener en cuenta que para adaptar este sistema al buque se tarda en torno a seis semanas que el buque no puede salir a navegar, por lo que no todos los buques pueden estar este tiempo fuera de las rutas comerciales y también supone una inversión importante, desde 1,7 a 8,8 millones de euros. La preocupación está en la construcción del scrubber y la parada en dique hasta que se finalice su reestructuración. Sólo el 17% de los buques mercantes emplean este sistema desde el año 2019, y en las rutas entre Asia y Estados Unidos en torno al 10% de los buques [103].

Un ejemplo real donde fue demostrado el éxito del scrubber, fue en el petrolero “MT Suula” mediante un scrubber de sistema abierto, que se redujo un 99% el SO_x, el NO_x desde un 5% a un 11% y partículas sólidas entre un 30 y 60% [104]. Se muestra en la figura 2-30 el “MT Suula”.



Figura 4-27 Buque “MT Suula” [104]

Se muestra a continuación Tabla 4-13 de resumen del empleo de scrubbers para los buques mercantes:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> + Se pueden utilizar carburantes pesados + Se puede retroalimentar + Reduce partículas en suspensión como el SO_x + Es atractivo para la mayoría de los mercantes 	<ul style="list-style-type: none"> - Inversión de 1,7 a 8,8 millones de € - Incrementa el consumo de combustible en 2-3% - Requiere espacio para su construcción - Requiere de agentes químicos (ciclo cerrado) - Integración con el sistema propulsor - Monitorización constante

Tabla 4-13 Ventajas y desventajas de un scrubber (elaboración propia)

5 PROPUESTAS

Habiendo analizado las distintas posibilidades en la actualidad, se procederá a explicar las alternativas que presentan una mayor viabilidad en términos de técnicos, económicos y ambientales, en base a todo lo analizado en apartados anteriores. Ordenándolas de corto, medio y a largo plazo.

A modo de previsión del consumo de las energías en el futuro, se muestra la siguiente Figura 5-1, la previsión de la demanda energética para el 2035 es muy distinta a la que se tiene actualmente. Se puede observar la decadencia de los combustibles fósiles y el alza de las energías renovables [105].

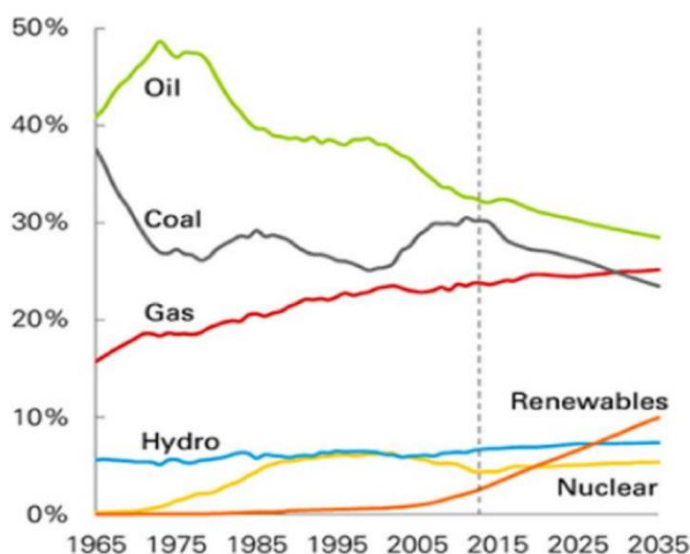


Figura 5-1 Previsión del consumo de energía primaria para 2035 [105]

5.1 Propuesta corto plazo: Diésel F-76 con biodiésel

La primera propuesta que se tiene en cuenta y que puede ser implementada a corto plazo sería la adición del biodiésel al diésel F-76. Existen dos métodos comúnmente utilizados para las mezclas de biodiésel: mezcla por salpicadura y la mezcla múltiple. Mezcla por salpicadura es cuando se agrega una cantidad de biodiésel puro junto con diésel de petróleo, agregados con cierta proporción. Esta mezcla ocurre de forma natural y es la preferida por los productores de biodiésel pues no requiere un alto costo, pero a veces no se alcanza la mezcla deseada. La mezcla múltiple, se carga el biodiésel y el diésel al mismo tiempo con un medidor y una válvula de cabezal común. Este ofrece un mejor resultado porque

se mezcla completamente antes de entrar al tanque. Los componentes de los motores más antiguos deben cambiarse por sellos sintéticos y manguitos resistentes al biodiesel. Resaltar que los filtros de combustible se deben de cambiar y limpiar el tanque de combustible antes del cambio a biodiesel [106].

Muchos de los productores de motores marinos más grandes del mundo comenzaron su investigación. Wartsila, MAN Diesel Company, Caterpillar con base en Europa, Estados Unidos y Japón, han identificado el papel del biodiesel como alternativo y están creciendo rápidamente. En la Tabla 5-1 se citan las principales empresas.

Marca	Estandares del biodiesel	Aprobación de la mezcla
Oruga	ASTM D6751/EN 14214	B30
Cummins	ASTM D6751/EN 14214	B5-B20
MAN Diésel	DIN EN 14214	Hasta B100
Wartsila	ES 14214	Hasta B100
Morse de Fairbanks	ASTM D6751	Hasta B100
Diésel Detroit	ASTM D6751	B5-B20
Volvo Penta	ES 14214	B7-B30
Yanmar	ASTM D6751/EN 14214	B5-B20

Tabla 5-1 Fabricantes de motores con biodiesel (elaboración propia basado en [106])

La problemática reside en:

- El biodiesel es sensible a la oxidación y susceptible a la degradación durante el almacenamiento. Por lo que los tanques deben de ser de acero, aluminio, fibra de vidrio o teflón.
- La producción de biodiesel requiere de una gran materia prima de biomasa, y en la actualidad se emplean aceites de cocina y grasas animales para aprovechar su vertido. Se requiere de grandes cantidades.
- Posee un alto costo de producción de la materia prima, purificación y producción. Afectando a un 75% del precio final del producto.
- Las partes que están en contacto con el biodiesel son el tanque de combustible, filtro de combustible, bomba de combustible, bomba de inyección y la boquilla de inyección. Esta naturaleza corrosiva depende de la materia prima utilizada. Hasta B20 puede prevenir problemas de compatibilidad de materiales.

Las normas ASTM D6751 (americana) y EN 14214 (europea) están dedicados a motores automotrices, no existe un estándar internacional específico para el biodiesel marino. Por lo que las especificaciones son diferentes (viscosidad cinemática, puntos de inflamación, residuos de carbono, etc.). El uso de combustibles marinos mezclados con biodiesel puede considerarse la forma correcta y más corta para reducir la contaminación del aire en el mar y cumplir con las regulaciones de la OMI. El biodiesel contiene una energía menor, sin embargo, no contiene azufre y mejora las condiciones ambientales. Por lo que no se debe superar el B20, es el permitido a día de hoy [107].

El biodiesel europeo está experimentando cambios al alza debido a la actual crisis energética en Europa. La limitada disponibilidad de la materia prima y el mayor coste de producción obligó a los proveedores a aumentar las cotizaciones ofrecidas para el biodiesel. Añadido al repunte del precio del petróleo, acentúa la subida de precio. A principios de 2022, el precio se encuentra a 1770€ por metro cúbico [108].

Con certeza, se podría afirmar que los motores actuales de la F100 (Bazan Bravo 12) explicados en 3.1.1.1, pueden funcionar con biodiesel B5 proporcionando un aumento del rendimiento del 2-3%, menor consumo del combustible y reducción de las emisiones de humo y gases contaminantes. El biodiesel B5 aporta un índice de cetano elevado, mayor lubricidad, bajo contenido en azufre y limpieza interna del motor. Esta adición no ha sido comprobada en este tipo de motores, pero en la US Navy sí que lo ha hecho en sus respectivos motores [109]. En la siguiente Figura 5-2 se puede ver la relación entre las emisiones y el porcentaje de biodiesel [110].

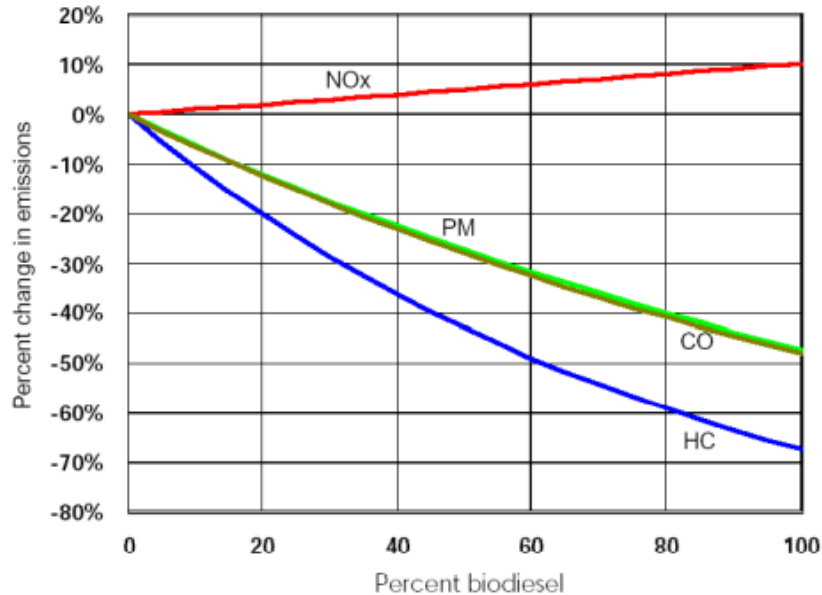


Figura 5-2 Relación emisiones con biodiesel [110]

El empleo de biodiesel B20 no está suficientemente desarrollado como para emplearlo sin haber realizado un estudio riguroso del motor a utilizar. El empleo de biodiesel B20 sin un estudio previo, puede resultar en consecuencias terminales para el motor.

A continuación se muestra la Tabla 5-2 señalando el coste del precio de los combustibles [111]. Señalar que la capacidad del tanque del biodiesel es el 5% del tanque de combustible de la fragata, de este modo en la mezcla de combustible siempre habría biodiesel B5 en su respectiva proporción.

	Diesel F-76	Biodiesel (B5)
Coste relleno tanque	526.400 €	66.553 €
Capacidad tanques	752.000 L	37600 L
Coste adquisición	0,7 €/L	1,7 €/L

Tabla 5-2 Precios combustible F-76 y biodiesel (elaboración propia basado en [111])

El tanque de almacenamiento debe de estar situado lejos de puntos de calor y el sol no debe de radiar directamente al tanque. A partir de 6 meses se puede empezar a perder propiedades y comienza la degradación. Debe de estar doblemente recubierto para evitar la polimerización y la oxidación. En la Tabla 5-3 se puede ver el coste de adquirir biodiesel para un buque sin tener en cuenta el coste del biodiesel [112].

Al no llevar un control de emisiones de forma exhausta en las fragatas, no se dispone de datos exactos para hacer su análisis. Por lo que se ha empleado una Tabla 5-4 de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes a la atmosfera en el puerto de Cartagena durante el año 2017, y los resultados de emplear biodiesel B5 en la Tabla 5-5.

Coste	Rango de precio
Tanque de biodiesel	Hasta 12.000 €
Limpieza de tanque	890 € al año
Modificación del motor	Hasta 1.200 € por motor
Distribución tanque-motor	Hasta 9500 €
Mantenimientos extra	250-300 €
Muestro anual	290 € al año
TOTAL	90.550 €

Tabla 5-3 Presupuesto adquisición biodiesel para un buque (elaboración propia basado en [112])

Maniobra y atraque		Consumo g de fuel/KWh	NO _x g/kWh	CO g/kWh	PM ₁₀ /PM _{2,5} g/kWh	CO ₂ g/kWh	CO ₂ t/tonelada combustible	SO ₂ kg/tonelada combustible
Motor principal	Media velocidad diésel	223	9,9	1,5	0,9	660	3,9	2
	Baja velocidad diésel	204	13	0,4	0,3			

Tabla 5-4 Emisiones gases de efecto invernadero y contaminantes a la atmósfera en el puerto de Cartagena en 2017

Maniobra y atraque		Consumo g de fuel/KWh	NO _x g/kWh	CO g/kWh	PM ₁₀ /PM _{2,5} g/kWh	CO ₂ g/kWh	CO ₂ t/tonelada combustible	SO ₂ kg/tonelada combustible
Motor principal	Media velocidad diésel	216	10	1,35	0,81	594	3,5	1,9
	Baja velocidad diésel	198	13,26	0,36	0,27			

Tabla 5-5 Variación de las emisiones empleando biodiesel B5 (elaboración Propia)

El coste de adquisición del biodiesel B5 completo tendría un sobrecoste de: 90.550€ el primer año con el tanque lleno. Se cumpliría con el convenio MARPOL en las restricciones de azufre, pero no se cumpliría respecto a las emisiones de nitrógeno en las zonas con Tier III, ya que incluso aumentan un 3% de su emisión normal. No obstante, el resto de emisiones disminuye. Resaltar, que ya con el combustible F-76 se cumplen las restricciones del azufre. Esta propuesta está más encaminada para el apoyo de la transición de la Armada Española al cambio climático, con la reducción de las emisiones de un manera económica y responsable y reducir las cantidades de CO₂.

5.2 Propuesta medio plazo: Tratamiento gases de escape

Para el tratamiento de los gases de escape hay que tener en cuenta la plataforma en cuestión y analizarla para ver los requerimientos técnicos. En la Figura 5-3 se puede ver dónde están las salidas de los gases de exhaustación de una F-100. Tiene dos salidas ya que tiene dos cámaras de máquinas separadas debido al diseño [113].



Figura 5-3 Fragata F100 española con escape de gases señalados [113]

A continuación, en la Figura 5-4 se ve la cámara de máquinas N°1 entre la cuaderna 112 y 130 y la cámara de máquinas N°2 entre la cuaderna 78 hasta la 100. La superestructura de la salida de los gases tiene forma cilíndrica y un diámetro interior de 2200 mm.

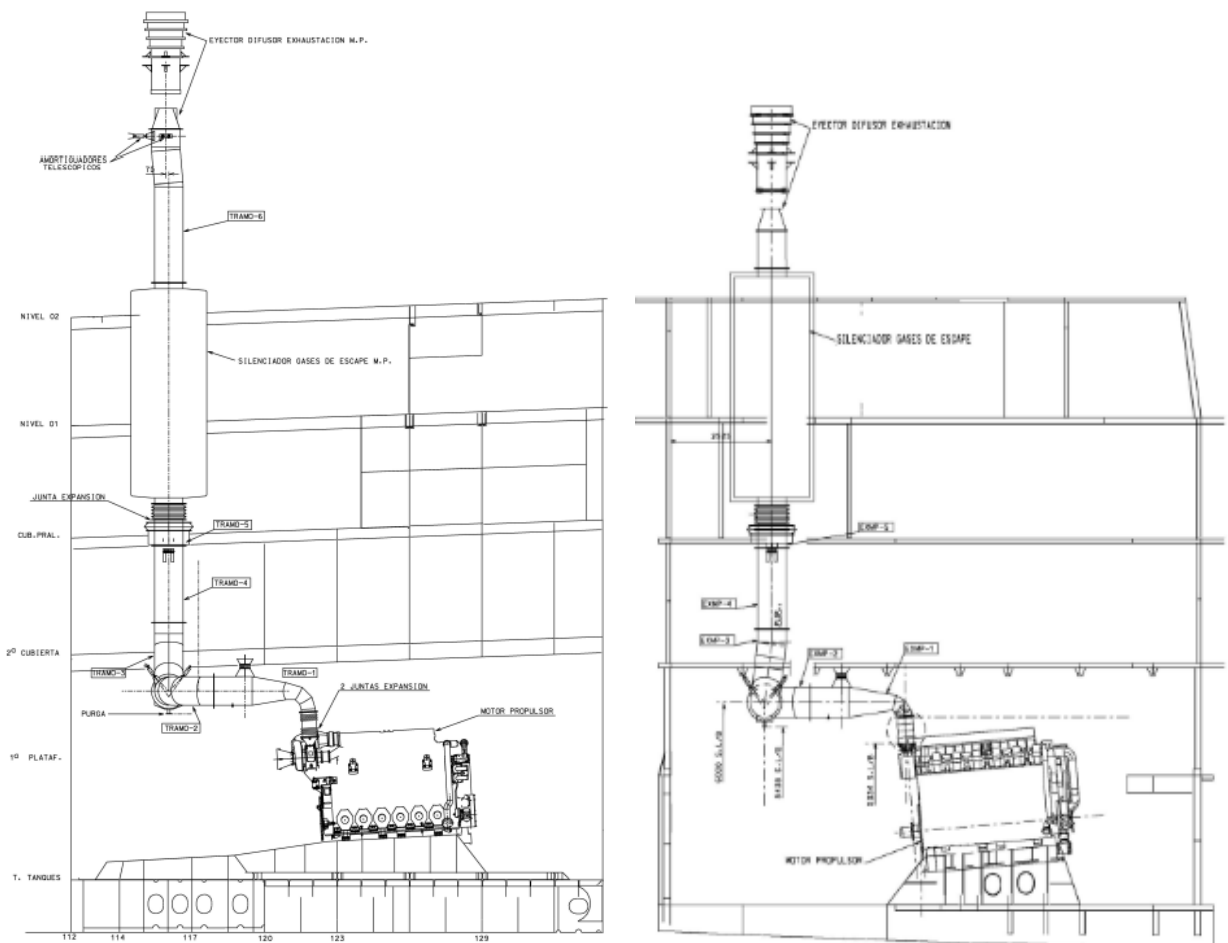


Figura 5-4 Plano de salida del escape del motor diésel propulsor de la cámara de máquinas Nº1 a la izquierda y del motor diésel propulsor de la cámara de máquinas Nº2 a la derecha [58]

El combustible empleado actualmente en la flota española es refinado para reducir el contenido en azufre para cumplir con el anexo VI del convenio MARPOL. Sin embargo, el resto de emisiones contaminantes no están reguladas y tampoco tienen un sistema de reducción de estas. Con la creciente demanda, el precio de este tipo de combustible refinado puede subir exponencialmente, por lo que el uso de combustibles pesados no se descarta tampoco. Tampoco se garantiza el suministro de gas al 100%, por lo que es conveniente diseñar un sistema de tratamiento de gases a la salida de la combustión para no depender del sistema de combustión y depender solo del tratamiento de la expulsión de gases de escape.

Por ello, el scrubber y el SCR, son los dispositivos ideales para cumplir con el convenio MARPOL. Estos dos dispositivos están explicados en 4.2.2.

5.2.1 Reducción Catalítica Selectiva (SCR)

En la siguiente Figura 5-5, se ve un esquema sintetizado de este dispositivo [114], en el que se presenta un balance de materia simplificado del sistema. De este modo, se puede entender de manera conceptual el funcionamiento de un SCR y cómo elimina los componentes NO_x a través del catalizador y la mezcla de urea.

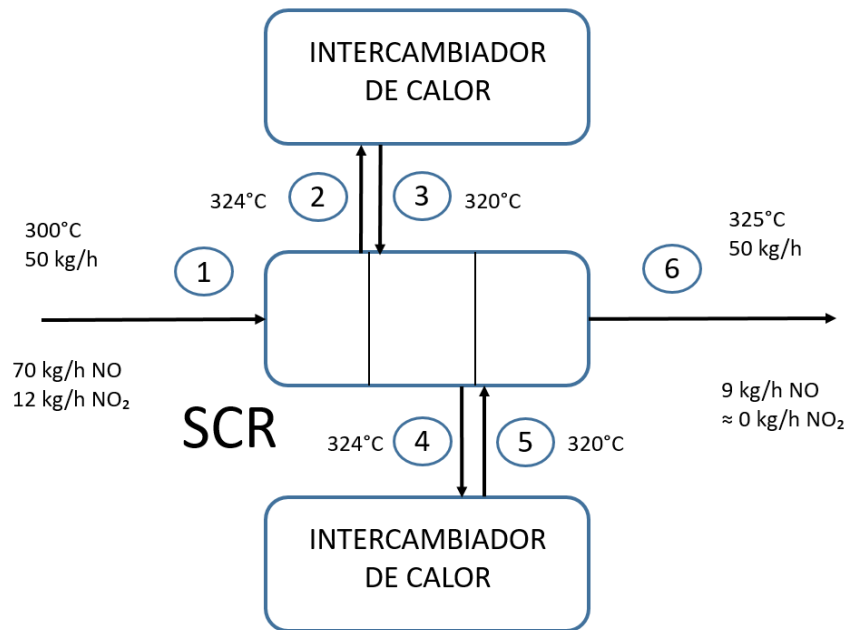


Figura 5-5 Esquema simplificado sistema SCR (elaboración propia basado en [119])

Resaltar que los cálculos están hechos con un buque de 5000 toneladas y a una velocidad media de 16,5 nudos, el motor está trabajando al 80% de su capacidad máxima. Entregando una potencia de 8.500 kW. Para el flujo másico de gases de escape (corriente N°1), se ha tenido en cuenta las emisiones típicas de un motor diésel marino [115]. Como se puede observar en 3.1.1.1, estos parámetros son muy similares a la fragata, por lo que se puede prever cómo funcionaría este sistema a bordo de la F-100.

Pero antes de llegar a la Figura 5-5, los gases de escape del motor deben de ser tratados para que una vez dentro del catalizador trabaje de manera eficiente. Los gases de escape del motor salen a 18 bares y a 400°C, la presión es posteriormente reducida mediante una válvula de expansión hasta 4 bares. Estos gases de escape son mezclados con urea. La urea es necesaria para provocar la reacción con los óxidos de nitrógeno. Entrando en el sistema a 300°C y con un flujo másico de 50kg/h. Se puede ver la reducción de las cantidades de NO_x desde la entrada N°1 hasta la salida N°6 (86% NO y 100% NO_2). El catalizador está dividido en tres lechos con un peso de 18 kg con una vida útil de 3 años. En este catalizador, en cada lecho se evita que la temperatura exceda los 325°C provocando un descenso considerable de la tasa de remoción de los NO_x , esto es debido a que el NO reacciona con el NH_3 de forma exotérmica.

A continuación, se observa en la Figura 5-6 cómo funciona el catalizador SCR para eliminar las partículas de NO_x [116].

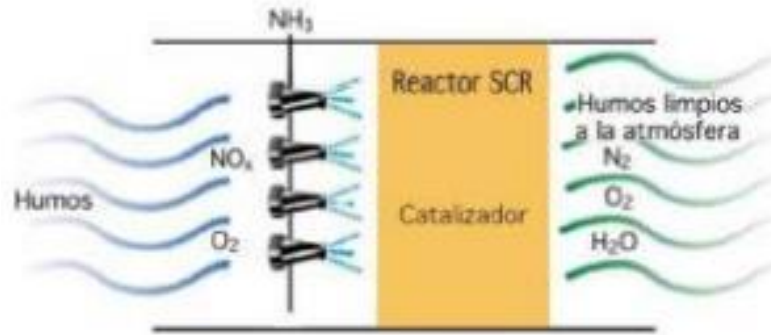


Figura 5-6 Sistema de funcionamiento del catalizador SCR [116]

En la Figura 5-7 se ven los planos del sistema de escape de los gases de los motores diésel propulsores y se señala dónde se instalaría el catalizador, aprovechando que ya existe un silenciador. Como se ha dicho al principio de este apartado, la salida de los gases tiene una forma cilíndrica con un diámetro interior de 2200 mm. El catalizador de la Figura 5-5 tiene un diámetro de 0,8 m y 5,2 m de largo, por lo que puede ser instalado sin necesidad de modificar la superestructura de la fragata. En la exhaustación de la turbina no tendría sentido instalar ningún catalizador ya que son para velocidades altas y las restricciones están cerca de costa, además de poseer altas cantidades de aire. Lejos de costa no existe una normativa para los buques de guerra que deban seguir debido a su necesidad operativa. De este modo se evita la instalación de 4 dispositivos SCR, encareciendo en gran medida el coste de la adquisición de este producto. También cabe resaltar que los motores diésel generadores utilizan el mismo conducto de salida en los gases de escape que los diésel propulsores, por lo que la instalación de un catalizador SCR en esta vía de exhaustación de los gases, sería suficiente. Habría que comprobar si la temperatura que alcanza el catalizador no supera el límite (325°C). Si ocurriese esto, habría que instalar intercambiadores de calor y regular la temperatura de forma más estricta. Esto supone un mayor encarecimiento.

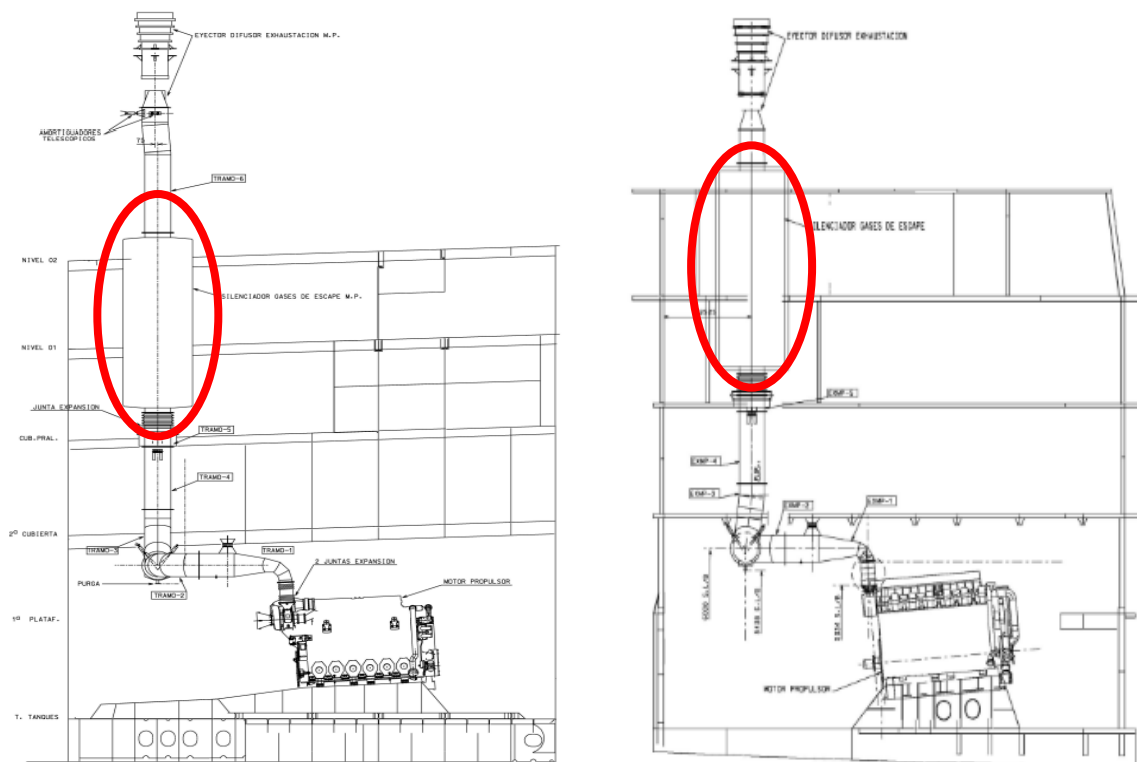


Figura 5-7 Planos de la estructura del escape de los gases en los motores diésel [58]

De acuerdo con un estudio realizado por la revista ‘Atmospheric Measurement Techniques’ [117], se estudió las emisiones de 11 buques con distintos sistemas de reducción de NOx. El resultado que se obtuvo fue que los sistemas SCR eran los más fiables y que mayor porcentaje de eliminación conseguían.

En relación a su coste, varía entre 70.000€ - 323.750€ con todo el sistema completo. Este valor depende del número de motores [118]. En la siguiente Tabla 5-4 se muestra el coste de la adquisición de los materiales sin tener en cuenta la instalación.

Dispositivo	Cantidad	Precio
Reactor Catalítico	1	14.000 €
Tanque urea	1	35.000 €
Intercambiador calor	3	200.000 €
Bomba	4	9.000 €
TOTAL		258.000 €

Tabla 5-4 Coste de un sistema SCR (elaboración propia basado en [119])

En la siguiente Tabla 5-5 se ve cómo afectaría el empleo de SCR a una F-100 de la Armada Española.

La esperanza de vida está alrededor de 3 años dependiendo de la temperatura, del motor, combustible y aceite lubricante. No es necesario cambiar el catalizador de manera íntegra, principalmente las membranas y los filtros.

Maniobra y atraque		Consumo	NO _x	CO	PM ₁₀ /PM _{2,5}	CO ₂	CO ₂	SO ₂
		g de fuel/KWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	t/tonelada combustible	kg/tonelada combustible
Motor principal	Media velocidad diésel	223	0,4	1,5	0,9	660	3,9	2
	Baja velocidad diésel	204	0,52	0,4	0,3			

Tabla 5-5 Emisiones gases efecto invernadero y contaminantes a la atmosfera con SCR (elaboración propia)

Se puede observar que las partículas de NO_x se reducen enormemente, por lo que se cumpliría con la normativa MARPOL respecto al nitrógeno. El empleo del F-76 junto con el SCR, hace que se cumpla al 100% las exigencias del convenio MARPOL en el anexo VI.

5.2.2 Scrubber

Si bien es cierto que el combustible suministrado a la Armada Española cumple con las exigencias actuales del SOx, existe la posibilidad de que este combustible se vuelva más caro ya que el proceso de refinamiento es costoso. Por lo que el uso de combustibles pesados no se descartada en ningún momento. Por ello, la adquisición de scrubbers para su reducción de emisiones SOx, puede dotar a los buques de independencia a la hora de adquirir el tipo de combustible. Además del ahorro que supone el uso de

combustibles pesados, al ser más barato que el F-76 por su proceso de refinado de desulfuración [120]. No todos los buques pueden permitirse un combustible bajo en azufre, la diferencia entre un combustible sin refinar de otro refinado varía en torno a 180 € por metro cúbico. Estimándose un sobre coste de 3 millones de € al año. En la siguiente Figura 5-8 se puede observar el número actual de scrubbers instalados y el número de pedidos hasta 2023 [121].

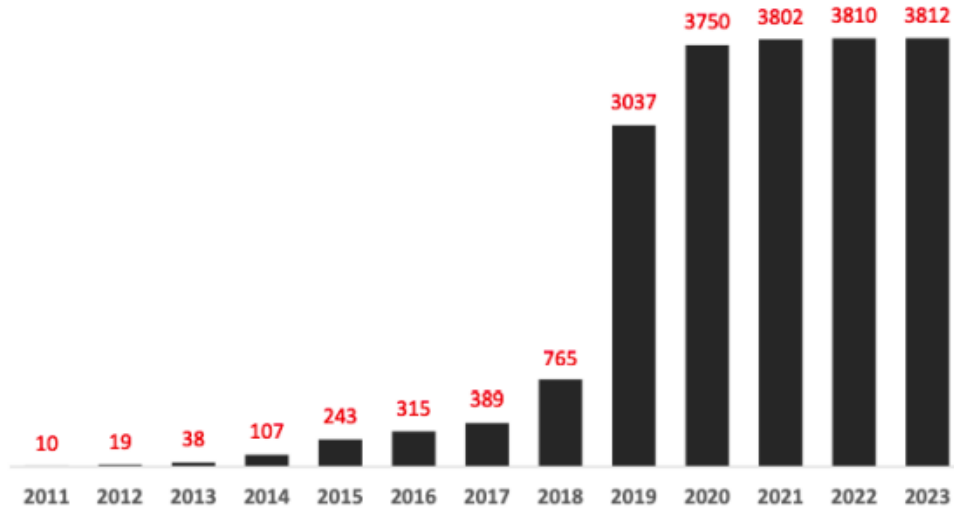


Figura 5-8 Número total de scrubbers instalados y bajo pedido [121]

Para elegir el scrubber hay que tener en cuenta una serie de características, ya explicadas en 4.2.1.3.

El scrubber de tipo húmedo cerrado es el idóneo para un buque de guerra. Ya que puede ser empleado en cualquier ECA del convenio MARPOL, al evitar los vertidos al mar sin ser tratados previamente. Emplea hidróxido de calcio, cal muerta o cal apagada, para el tratamiento del vertido del agua a la salida del scrubber. Tratándose de una reacción exotérmica, liberando energía al medio en su proceso al circular los gases de forma horizontal por el lecho de cal. Eliminiéndose SOx y partículas sólidas. Los efluentes tratados pueden ser vertidos al mar de forma segura, también se puede evitar la descarga e ir almacenando la descarga a bordo hasta la llegada a puerto. Los principales componentes se pueden ver en la siguiente Figura 5-9 [122].

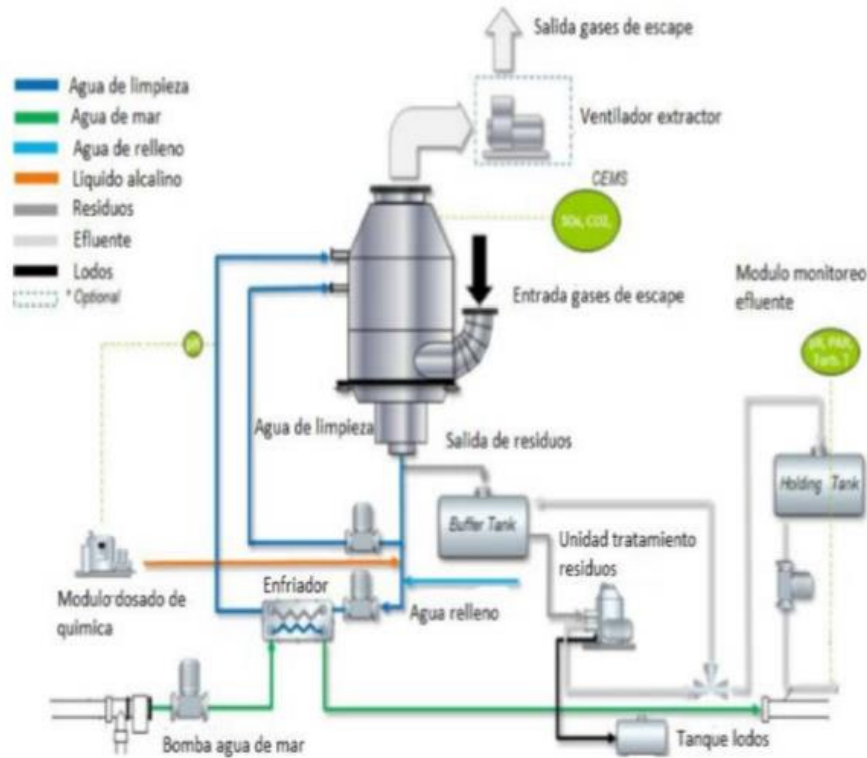


Figura 5-9 Scrubber tipo húmedo cerrado [122]

El coste de instalar un scrubber a un buque ya fabricado es de 4-4,5 millones de €. Si se instala durante su fabricación, su precio está en torno a 3 millones de € [123]. Empresas como Wartsila afirman que el plazo de amortización va de entre 1 a 3 años dependiendo del tamaño del buque. En la siguiente Tabla 5-6 se muestran los costes de adquisición de los materiales sin tener el coste de la instalación [119].

Dispositivo	Cantidad	Precio
Scrubber	1	1.240.000 €
Tanque NaOH	1	18.000 €
Turbina	1	320.000 €
Bomba	2	5.000 €
TOTAL		1.583.000 €

Tabla 5-6 Coste de un sistema scrubber (elaboración propia basado en [119])

Su consumo energético es mínimo, se pueden eliminar también de manera parcial compuestos NO_x, ayudando a cumplir así con el convenio MARPOL, se emplea material granulado (manejo sencillo y reciclable) y no se transmiten contaminantes al mar en el proceso. Existen parámetros clave en la instalación de un scrubber: riesgo de incumplimiento como resultado de la falla operativa del sistema, contrapresión en la línea de salida de gases de escape, velocidad del gas de escape, mantenimiento, capacitación de la tripulación y carga de trabajo.

En la siguiente Figura 5-10 se puede ver cómo funciona el scrubber según los flujos másicos, la variación de temperatura y el porcentaje de azufre que elimina [119], en el que se presenta un balance

aproximado del sistema. Para así entender de manera conceptual el funcionamiento de un scrubber y como elimina los componentes SO_x .

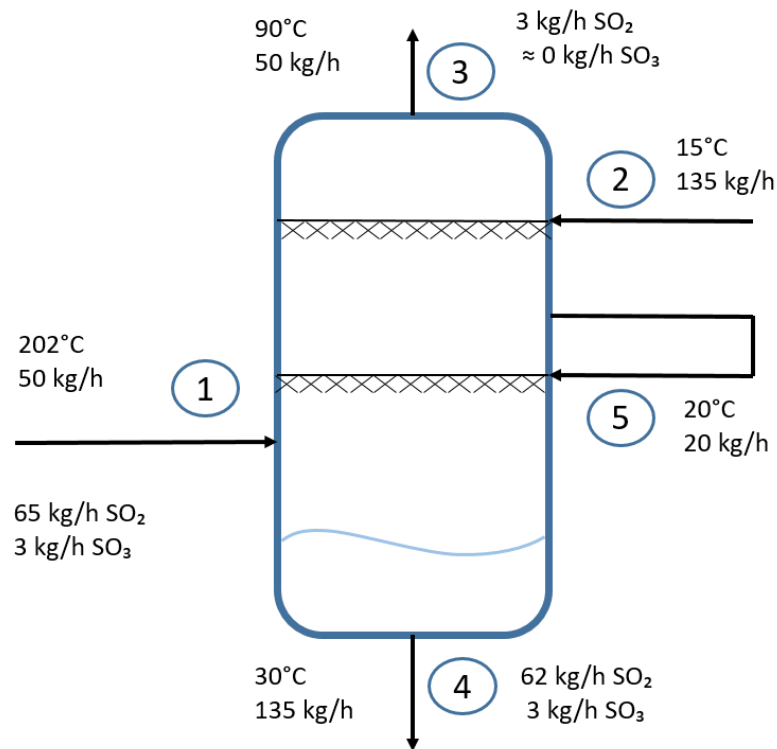


Figura 5-10 Esquema simplificado de un scrubber (elaboración propia basado en [119])

Para los cálculos empleados, se ha utilizado los mismos parámetros que en 5.2.1 y el flujo másico extraído de las emisiones típicas de un motor diésel marino [115].

En la corriente N°1 entran los gases de escape del motor, que salen de este a 400°C y a 14 bares, para la entrada al scrubber se necesita que este gas esté a presión atmosférica. Mediante una válvula de expansión y una turbina, se consigue reducir esta presión a 1 bar y reducir la T^a , permitiendo la entrada al scrubber. Estos gases se mezclan con agua de mar pulverizada (N°2 y N°5), mediante dispersores. Los SO_x son eliminados eficientemente (95% SO_2 y 100% SO_3) como se puede ver en la extracción de gases en el flujo N°3. Es necesario un flujo de agua de mar de aproximadamente 135 kg/h (N°2). El flujo N°5 recircula el agua de mar que ha sido previamente introducido. La corriente N°4, tiene un pH de 2,5 debido a la absorción de azufre. Para su vertido al mar, se necesita sosa cáustica para acondicionar el pH hasta 6,5. En un scrubber de tipo cerrado, el agua de mar empleada se almacena en tanques.

Este proceso es muy útil para contaminantes gaseosos con sustancias solubles, como es el caso de los óxidos de azufre. Además, al ser esta agua pulverizada, mejora el contacto con el gas a tratar. El agua salada es útil porque debido a los iones sulfito y sulfato están presentes en el agua, a parte de la alcalinidad y salinidad que mejora la absorción del SO_x .

En la siguiente Tabla 5-7 se puede ver como el scrubber reduce ampliamente el SO_2 (90%) y las PM en torno al 80%. Las partículas NO_x también son reducidas, pero no lo necesario para alcanzar las zonas Tier III que restringen el vertido de compuestos de nitrógeno.

EVALUACIÓN DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS Y TECNOLOGÍAS
PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES EN LA PROPULSIÓN DE FRAGATAS

Maniobra y atraque		Consumo	NO _x	CO	PM ₁₀ /PM _{2,5}	CO ₂	CO ₂	SO ₂
		g de fuel/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	t/tonelada combustible	kg/tonelada combustible
Motor principal	Media velocidad diésel	223	6	1,5	0,09	660	3,9	0,2
	Baja velocidad diésel	204	7,8	0,4	0,03			

Tabla 5-7 Emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes a la atmósfera con scrubber (elaboración propia)

Por lo que el instalar un scrubber en un buque de guerra solo sería rentable si se utilizase un combustible pesado durante muchos años para rentabilizar el proceso (4-4,5 millones de €). Esto puede suceder ya que los combustibles sin refinar solo serán adquiridos por los barcos que puedan hacer frente al convenio MARPOL a través de un scrubber o similares. También estaría la opción de fabricar un buque e instalar desde el principio un scrubber de este tipo para abaratar el coste de instalación (3 millones de €). Además hay que tener en cuenta que el scrubber de la Figura 5-10 tiene unas dimensiones de 3 m de ancho y 6 m de largo, por lo que no es viable técnicamente ya que el diámetro de la salida de los gases es de 2200 mm.

Como se ha dicho al principio de este apartado, la diferencia entre un combustible bajo en azufre y otro sin estar desulfurado, es de aproximadamente de 180 €/m³. Sabiendo que cuando la fragata cuando es desplegada a una misión con la OTAN, está en torno a 140 días operativa [124]. En la siguiente Tabla 5-8 se puede ver el consumo del combustible y la diferencia de costes si se emplea un combustible u otro.

En puerto	34 días
Navegando	87 días
Repostaje y salida	19 días
Consumo total misión	2.900.000 L
Consumo medio	20.714 L/día
Coste F-76	0,7 €/L
Coste diésel pesado	0,5 €/L
Coste total F-76	2.030.000 €
Coste total diésel pesado	1.450.000 €
Diferencia	580.000 €

Tabla 5-8 Parámetros despliegue misión de una F-100 (elaboración propia basado en [124])

Se observa que existe una diferencia de 580.000 € entre un combustible y otro. Sabiendo que el coste de instalación de un scrubber en su fase de construcción es de 3.000.000 € y que una fragata es desplegada a una misión OTAN cada dos años. El tiempo de amortización sería de 10 años. No se ha considerado la varada en dique y construcción del scrubber en una fragata F-100 española, ya que no es físicamente viable su instalación.

Resaltar que lo ideal para emplear cualquier combustible y cumplir siempre con las restricciones del convenio MARPOL, sería la instalación de los dos componentes, SCR y scrubber. El SCR elimina las sustancias NO_x y el scrubber las sustancias SO_x . De esta manera los gases que son expulsados al aire son siempre tratados y están por debajo de los límites del anexo VI. El problema reside en que estos dos sistemas ocupan mucho espacio y no sería viable para un buque de guerra. Es por ello, que se debe de elegir un sistema de los dos planteados en función del combustible a emplear. Aún quedan bastantes años de uso de combustibles bajo en azufre como el F-76, es por ello que esta propuesta está planteada para ser a medio plazo.

5.3 Propuesta largo plazo: Biometano

El uso del biometano es la alternativa 100% renovable sin ser derivado del petróleo, que está predestinado a ser el relevo del diésel. El GNL sigue siendo una reserva natural que en algún momento llegará a su fin, pero la biomasa de donde se extrae el biogás, es un proceso infinito en la agricultura y ganadería que es necesario en el día a día para la cadena alimenticia del ser humano. Por lo que conseguir un combustible en este proceso, es uno de los objetivos que la Unión Europea quiere conseguir.

Se puede lograr este objetivo de dos modos distintos: fabricando un buque nuevo o con la remotorización. A través de la remotorización no sería el proceso más eficiente ya que sería necesaria un rediseño del motor propulsor, así como añadir tanques de gas y su respectiva red de presión para la distribución interna del buque. El precio de la remotorización para un buque de 8500 toneladas sería de 25,6 millones de €, siendo una opción muy cara. Una fragata F-100 tiene 5400 toneladas, siendo poco más de la mitad, sin embargo, teniendo en cuenta que un carguero tiene más espacio para su sistema de propulsión y no requiere de tantos elementos como una fragata (Sistema de combate, Armas, Hangar de vuelo, etc), por lo que el precio de esta remotorización puede ser de alrededor de los 25,6 millones de € o incluso de más cantidad. El proceso de dique de la fragata y modificar sus características, sería muy costoso y no es cuestionable [125]. Una fragata ya tiene su espacio maximizado, por lo que añadir más elementos no sería una buena idea, además de que un tanque ocupa mucho espacio. En consecuencia, la fabricación de un buque que funcione con biogás sería la mejor alternativa, de este modo se diseñaría tanto la distribución de los tanques de almacenamiento como su distribución de la manera más eficiente para seguir obteniendo la discreción que se caracteriza su silueta. Su coste de adquisición de la planta propulsora estaría en torno a 12 millones de €, dependiendo de las exigencias y del tonelaje del buque en cuestión [125].

En la siguiente Tabla 5-9 se muestran las emisiones que se obtendrían al emplear biometano como combustible [126].

Tipo de combustible	SO_x (g/kWh)	NO_x (g/kWh)	PM (g/kWh)	CO_2 (g/kWh)
Fuel Residual (3,5% azufre)	13	9-12	1,5	580-630
Diesel Marino (0,5% azufre)	2	8-11	0,25-0,5	580-630
Gasoil (1,1% azufre)	0,4	8-11	0,15-0,25	580-630
Biometano/GNL	0	2	0	430-480

Tabla 5-9 Emisiones contaminantes biometano (elaboración propia basado en [126])

Existen varias empresas internacionales que suministran motores que emplean gas natural o biometano, como pueden ser Caterpillar-Mak, Daihatsu, Man Diesel & Turbo, Rolls-Royce y etcétera. Se muestran a continuación las principales configuraciones:

➤ **LBSI (Learn Burn Natural Gas Spark Ignition Engine)**

La principal variante de motor que emplea solo gas como combustible. Consigue su ignición a través de una chispa con exceso de aire suministrando gas a baja presión (3-5 bar) obteniendo la energía [127].

Este tipo de motores consigue rendimientos superiores a los motores diésel. En concreto, el motor BERGEN B36:45 de Rolls-Royce entrega una potencia de entre 3,6 y 5,4 MW con un número variable de cilindros, de 6, 8 o 9. Es una de las configuraciones predestinadas a ser el futuro de los motores marinos [128]. En la siguiente Figura 5-11 se ve un esquema del sistema LBSI y el motor BERGEN representado.

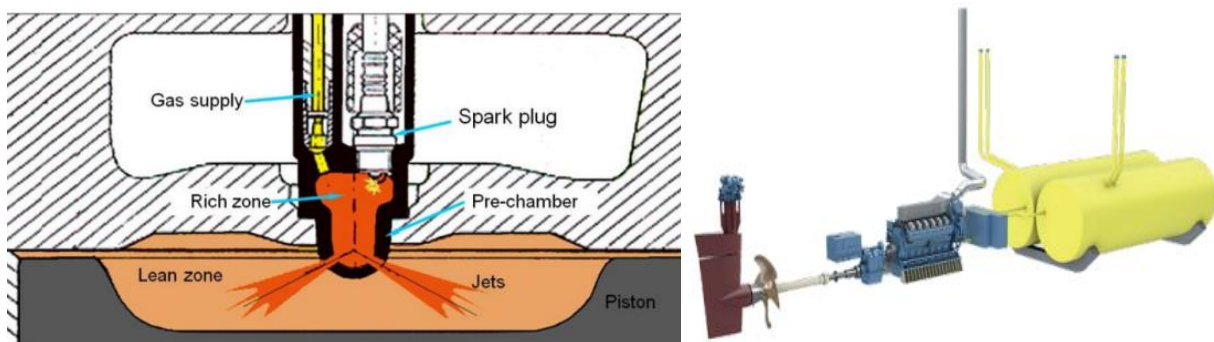


Figura 5-11 Sistema LBSI a la izquierda [127] y motor BERGEN B36:45 Rolls-Royce a la derecha [128]

El coste de la unidad del motor está en torno a 2 millones de €.

➤ **Dual-Fuel Engine (DF)**

La alternativa sería la combustión de manera dual entre el gas y el diésel (98% gas y 2% diésel), la cantidad de combustible es necesaria solo para provocar la ignición en la combustión. Este proceso es de los más utilizados actualmente para seguir aprovechando el diésel y emplear casi el 100% de la capacidad en gas [129]. En la siguiente Figura 5-12 se puede ver un esquema explicativo y un motor DE35DF.

El motor DE35DF de DAIHATSU, es un motor 4 tiempos de entre 6 u 8 cilindros que entrega una potencia de entre 3 a 4,1 MW [128].

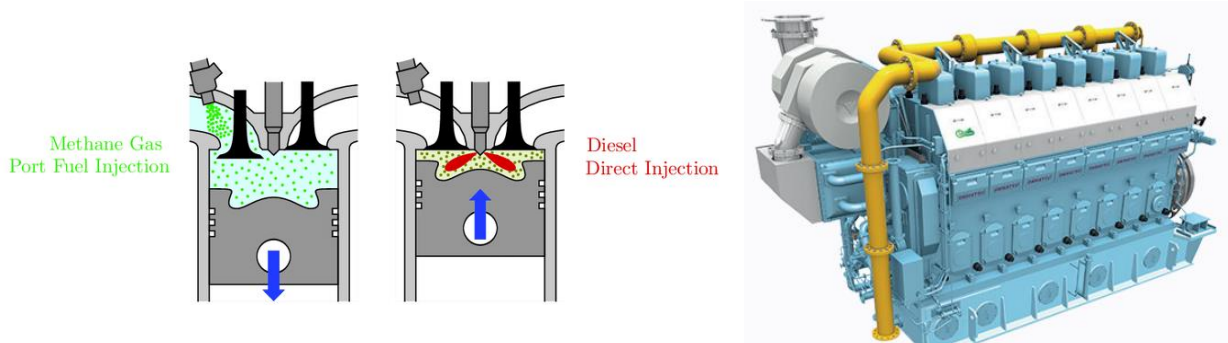


Figura 5-12 Sistema DF a la izquierda [129] y motor DE35DF de DAIHATSU a la derecha [128]

El coste de la unidad de motor está en torno a 1,2 millones de €.

En la siguiente Figura 5-13 se ve como iría instalado el sistema propulsor a gas en un buque. [130]

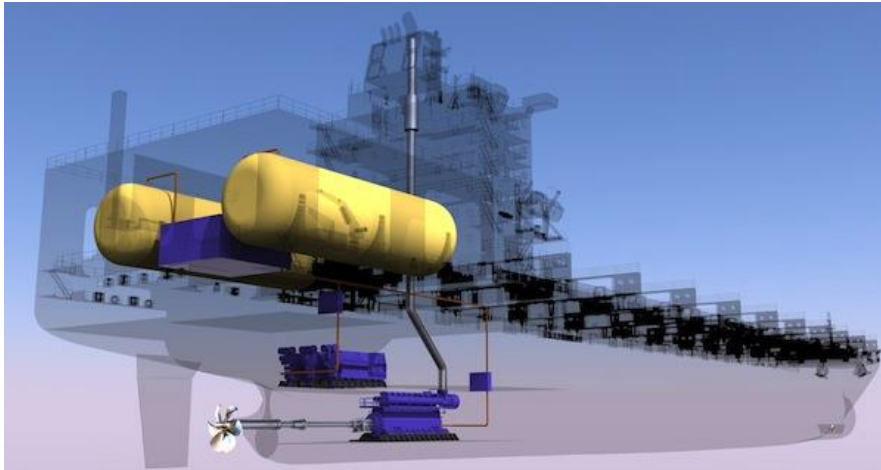


Figura 5-13 Sistema propulsión a gas en un buque [130]

De acuerdo con un estudio realizado por MARINTEK [131], el combustible a gas supone unos costes adicionales de un 10-15% de un buque convencional. Esto está relacionado con los tanques de almacenamiento y su sistema de distribución por tuberías. Para un buque de 5600 toneladas de peso sin carga adicional, se estima que supone 3,2 millones de €. Para el estudio de una fragata F-100 este valor sería bastante aproximado, ya que una F100 tiene 5400 toneladas de peso sin carga adicional.

Según Balearia, un tanque de 425 m³ de capacidad, permite obtener 1.100 millas náuticas de navegación [132]. Como se puede ver en Figura 5-13, este tipo de tanques ocupa bastante espacio. Un tanque de gas para un volumen de 425 m³ tiene unas dimensiones de 5 metros de diámetro y 22 metros de largo, el gas almacenado a 1 bar y a -160°C, con estas condiciones se aprovecha más el biometano, ya que se puede almacenar más cantidad y recorrer distancias mayores. En cambio, si se quiere almacenar como se hace en GNV (Gas Natural Vehicular), habría que almacenarlo a una presión de 200 bares y recorriendo distancias menores. Para asimilar el tamaño de este tanque, es el doble de grande que un camión cisterna de combustible de REPSOL. Cabe destacar que este tanque debe estar situado por encima de la línea de flotación y se ha dimensionado de tal forma que no ocupe más de una cubierta.

Los tanques de la F100 tienen una capacidad de 725 m³ permitiendo una autonomía de 4500 millas náuticas. Este tipo de propulsión disminuye enormemente su capacidad operativa, por lo que no es eficiente construir una fragata con gas como combustible, al menos hasta el momento. Este combustible es adecuado para buques que no requieran de tantas capacidades como pueden ser buques hidrográficos, aprovisionamiento, remolcadores, auxiliares, etc. Este tipo de buques puede emplear este sistema propulsor sin verse enormemente perjudicado.

Como resultado se obtiene que la mejor opción para establecer biometano como combustible es realizando la instalación cuando se esté ensamblando el buque, suponiendo un coste de 13 millones de € en todo su proceso completo. La problemática reside en que el biometano no está 100% desarrollado, existen buques que emplean este gas pero están en estudio, (ver en 4.1.3). Destacar que el GNL y el biometano tienen las mismas propiedades y los mismos porcentajes, la diferencia reside en que el GNL es un gas natural procedente de combustibles fósiles y el biometano es energía renovable, su principal desventaja es su elaboración.

El precio del biometano está alrededor de 90 €/MWh actualmente, con el desarrollo de esta tecnología y el aumento de plantas de obtención de biometano, este precio sería reducido para el año 2030 en torno a 10 €/MWh. Para el año 2050, esto se vería aún más reducido ya que se espera alcanzar en Europa la contaminación zero. Las tecnologías renovables serán impulsadas a través de subvenciones y abaratamiento de su adquisición [133]. Con el paso del tiempo y la subida de precios de los

combustibles fósiles, además de la exigencia de las emisiones en 2050 para conseguir energías 100% renovables y alcanzar la independencia de las principales distribuidoras de petróleo. El desarrollo de esta tecnología es clave.

El precio del GNL estaba a 50 €/MWh a finales del 2021, pero a comienzos del año 2022 con la reducción del suministro a España debido al conflicto entre Ucrania y Rusia y la ruptura de relaciones diplomáticas entre Marruecos y Argelia, este gas se ha visto enormemente encarecido, llegando a picos de 200 €/MWh. Durante el mes de marzo de 2022, el precio de GNL está en torno a 150 €/MWh y bajando [134]. Entre la inestabilidad del precio del gas natural como la dependencia hacia los países externos, hace del biometano un producto clave para dar una solución a los combustibles fósiles dependiendo de la cantidad de biomasa que se genere dentro del mismo país.

Por otro lado, teniendo en cuenta la Tabla 4-3 y en función del tipo de biomasa, se puede ver la cantidad necesaria de este componente para rellenar el tanque. Por ejemplo, harían falta alrededor de 14 toneladas de estiércol de cerdo para el tanque. Sabiendo que un cerdo puede pesar entre 50 – 110 kg y que puede producir 3,5 kg de estiércol al día, haría falta una granja porcina con 4000 cerdos para producir esta biomasa en un día o una granja con 135 cerdos para generar esta cantidad en un mes.

Añadir que se pueden aprovechar parte de la biomasa generada por la dotación del buque para generar biogás. Para su cálculo, se ha seguido los valores medios realizados por “Laboratorios Normon”. Un marinero sano sigue una dieta mixta (vegetariana y cárnica) generando aproximadamente 200 g de excrementos, asumiendo que realiza las tres comidas (desayuno, comida y cena).

$$200 \frac{\text{gramos}}{\text{persona}} \times 201 \text{ personas} = 40 \text{ kg diarios}$$

De esta cantidad, hay que tener en cuenta que solo se aprovecha el 24% porque el resto es agua, se pierde a su vez un 5% debido a la humedad y finalmente se pierde otro 28% por la degradación de esta materia.

$$40 \text{ kg} \times \frac{24}{100} \times \frac{95}{100} \times \frac{72}{100} = 6,6 \text{ kg biomasa}$$

Se ve a continuación lo que se puede producir de biogás

$$0.0066 \text{ toneladas} \times 1200 \text{ m}^3 \frac{\text{biogás}}{\text{tonelada de masa volátil}} = 8 \text{ m}^3 \text{ de biogás diarios}$$

Señalar que los 1200 m³ de biogás / tonelada de masa volátil representa la producción de biogás y en función de la composición de la biomasa, será mayor o menor. Va desde 900 hasta 1200, escogiendo el mejor de los casos [135]. También se ha tenido en cuenta la biomasa que se puede generar a través de los deshechos de la comida, pero esta no es lo suficientemente rentable en una fragata. Este hecho se puede aprovechar en grandes cruceros transatlánticos de más de 5000 personas o similares.

Lo que si se podría afirmar es que con tanto con GNL como biometano se consiguen cumplir con la normativa MARPOL en lo que respecta al azufre y al nitrógeno, pudiendo navegar por cualquier zona del planeta.

A modo de resumir las tres propuestas de una manera más clara, se hace la Tabla 5-10 para ver sus principales cometidos y apuestas.

Propuesta	Plazo	Ventajas	Precio	Estado	Objetivo	Viabilidad Técnica
F-76 y biodiesel	Corto	Reducción de emisiones excepto NO _x	90.550 €	Está demostrado	Reducción huella de CO ₂	Cualquier buque
SCR Scrubber	Medio	Reduce NO _x Reduce SO _x	258.000 € 1.583.000 €	Está demostrado	Cumplir convenio MARPOL	Depende de la estructura gases escape
Biometano	Largo	No contamina	13.000.000 €	Profundizar investigación	Combustible 100% renovable	Buques menos operativos

Tabla 5-10 Resumen de las propuestas (elaboración propia)

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este apartado se expondrán las conclusiones del TFG y se analizará el cumplimiento de los objetivos propuestos. Después, se propondrán algunas líneas futuras de trabajo para continuar con el desarrollo de las propuestas en el plano marítimo.

6.1 Conclusiones

Tras haber finalizado el trabajo, se pueden extraer conclusiones de una forma clara. El aprovechamiento de la biomasa, es un proceso cíclico que se puede emplear para producir biogás. Como bien es sabido, España es un país en el que abundan las granjas, así como, todas las ciudades tienen un tratamiento de vertido de aguas residuales donde se genera biomasa. Teniendo en cuenta de que se puede extraer la materia prima desde muchas fuentes, la inversión en este método parece factible. Su similitud con el gas natural, puede hacer posible que se transporte por la misma red de distribución de gas.

La apuesta por el biometano por parte de España, haría que se situase como uno de los países pioneros en Europa. Como ya se ha explicado, es una tecnología que reduciría la dependencia de la importación de los derivados del petróleo. Otra razón de peso sería la irregularidad del precio del gas natural, siendo a día de hoy, más caro que el biometano debido a los conflictos entre Ucrania y Rusia y también Marruecos y Argelia. El biometano es una propuesta que realmente funciona. Su uso en buques que no requieran de muy altas velocidades y la reducción de la autonomía. Hace que pueda ser empleado en cualquier tipo de buque que no sea una fragata o un destructor por sus exigencias operacionales. Sin embargo, no se apoya con suficientes incentivos a esta tecnología como se hace con la generación de electricidad 100% renovable. Tampoco existe una normativa común europea acerca de la calidad de este gas, cada país desarrolla su normativa que lamentablemente difiere con el resto de países. También existe la falta de reconocimiento político debido al desconocimiento de este gas, es por ello que se debe de dar a conocer para sacar el máximo rendimiento del biometano.

La incorporación de un catalizador SCR o una torre scrubber, debería ser realizada en buques que estén siendo construidos, de este modo es más económico que modificar un buque ya a flote. Por otro lado, la selección de cualquiera de estos dos dispositivos, requiere por parte de los armadores de un coste importante por adelantado, pero el ahorro de combustible puede ser mayor en función del tiempo que se transite por las ECA y la diferencia entre el diésel pesado y el diésel bajo en azufre. Estos dispositivos son una opción que presentan su rentabilidad a medio plazo y que permiten el empleo de cualquier combustible derivado del petróleo compatible con el motor. Permitiendo de este modo, el cumplimiento del convenio MARPOL en cualquier ECA

El empleo del biodiesel B5, puede ser utilizado desde ya para reducir la huella de CO₂, así como los hidrocarburos y las PM, durante los despliegues de las fragatas y de cualquier buque de la Armada.

Además, se puede aprovechar la materia prima para extraer este combustible, desde el refinamiento del cultivo de girasol, hasta su reprocesamiento como aceite usado en grandes cantidades.

Como se puede ver a lo largo del proyecto, el establecer un nuevo sistema de propulsión es complicado. Se necesita el apoyo de la investigación y la certeza de que esta tecnología realmente funciona. Lo que se podría decir con total seguridad es que la renovación del petróleo es inminente, por lo que acostumbrarse a los límites y explotar las ventajas de estas alternativas, es un factor clave. Si bien es cierto, no existe una energía renovable que sea 100% fiable y que todos los países puedan disfrutar de ella. De esto depende los recursos que tenga el propio país para poder explotar esta energía y obtenerla en forma de combustible en la forma más rentable posible.

En relación al análisis de los objetivos, se ha conseguido con éxito el análisis del primer objetivo, explicando en detalle la propulsión a la que se enfrenta este trabajo y si las diferentes tecnologías que se han propuesto son viables técnicamente para esta plataforma. También se han propuesto varias alternativas para el combustible F-76 y el gas natural, pues estos no dejan de ser combustibles fósiles que, en algún momento tarde o temprano, o llegaran a su fin o su precio será inalcanzable. Además del objetivo del tratamiento de los gases de escape, haciendo de esta una propuesta ambiental para el presente cumpliendo con el exigente convenio MARPOL. Por lo que se han de tener en cuenta estas alternativas para evitar prohibiciones y sanciones económicas de cara al futuro.

Se ha realizado un análisis de la reducción de las emisiones, así como balances energéticos en los post-tratamientos para visualizar mejor la acción de estos dispositivos y cómo de efectivos pueden llegar a ser. Como consecución de todo lo expuesto, se ha hecho una tabla resumen de las propuestas realizadas y su plazo de tiempo para emplear la tecnología.

6.2 Líneas futuras

A lo largo del desarrollo y ejecución del trabajo, han surgido distintas líneas de investigación que no han sido profundizadas en este TFG. Por esta razón, continuando con la línea de trabajo de este proyecto, se proponen las siguientes líneas futuras de investigación:

- Estudiar otros sistemas propulsores, como pueden ser las pilas de hidrógeno o diferentes sustancias químicas (etanol). Comprobando si es eficiente para buques de gran tamaño o para buques de menor porte.
- Profundizar en el estudio del biodiesel B20 y superiores para conocer sus límites en motores diésel pesados lentos para conseguir una mayor reducción de CO₂.
- Proponer un sistema automatizado para la recolección de datos de las emisiones en los buques de la Armada Española, llevando así un control exhaustivo del cumplimiento de la normativa.
- Estudiar las capacidades que se tendrían con el empleo de biometano en un buque que no requiera de velocidades altas (aprovisionamiento, hidrográfico, remolcador, transporte, etc.).

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «IPCS,» 2014. [En línea]. Available: <https://madmimi.com/s/613c05>. [Último acceso: 15 Enero 2022].
- [2] F. d. M. López, Evaluación de las Consecuencias de la Nueva Regulación de la OMI sobre Combustibles Marinos, Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, 2015.
- [3] «infobae,» 27 Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.infobae.com/america/ciencia-america/2021/02/09/los-contaminacion-producida-por-los-combustibles-fosiles-estuvo-vinculada-a-87-millones-de-muertes-en-2018/>. [Último acceso: 27 Diciembre 2021].
- [4] M. Planelles, «El País,» 30 Diciembre 2021. [En línea]. Available: <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/cambio-climatico/2021-11-04/el-espejismo-de-la-pandemia-las-emisiones-globales-de-co-rebotaran-un-5-y-volveran-a-los-niveles-precovid.html>. [Último acceso: 30 Diciembre 2021].
- [5] «Aviation and shipping in the spotlight,» European Environment Agency, 2016.
- [6] A. F. Varela, «Un informe de la UE asegura que el transporte marítimo supone el 14% de la emisiones contaminantes del sector logístico y pide una transición ágil para descarbonizar Europa en 2050,» Business Insider, 2021.
- [7] A. Española, «Desguace y Reciclaje de Buques, Un Problema en Vías de Solución,» 2008.
- [8] N. B. Planas, Prevención y control de la contaminación. Aplicación práctica a bordo de los buques de los anexos I, IV y V del convenio MARPOL 73/78, Cantabria: Escuela Técnica Superior de Náutica, 2015.
- [9] Declaración de la conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente humano.
- [10] Marco convención de las Naciones Unidas sobre el cambio climático.
- [11] «Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico,» [En línea]. Available <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/default.aspx>. [Último acceso: 4 Febrero 2022].
- [12] «Generalitat Valenciana,» [En línea]. Available: <https://agroambient.gva.es/es/web/calidad-ambiental/la-acidificacion-del-medio-ambiente>. [Último acceso: 27 Enero 2022].

- [13] «ISO,» Marzo 2017. [En línea]. Available <https://www.iso.org/standard/64247.html#:~:text=ISO%208217%3A2017%20specifies%20the%20requirements%20for%20fuels%20for,conventional%20onboard%20treatment%20%28settling%2C%20centrifuging%2C%20filtration%29%20before%20use..> [Último acceso: 1 Febrero 2022].
- [14] «ISO,» Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://www.iso.org/standard/75113.html>. [Último acceso: 1 Febrero 2022].
- [15] «Ingeniería Marítima Venezuela,» 2020. [En línea]. Available <http://ingmaritima.blogspot.com/2017/06/zonas-eca.html>. [Último acceso: 26 Enero 2022].
- [16] «Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico,» [En línea]. Available <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/visor/default.aspx>. [Último acceso: 27 Enero 2022].
- [17] «Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos,» 4 Junio 2021. [En línea]. Available <https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles#:~:text=PM%20significa%20material%20particulado%20%28tambi%C3%A9n%20llamado%20contaminaci%C3%B3n%20por,y%20oscuras%20como%20para%20verlas%20a%20si%20m.> [Último acceso: 22 Febrero 2022].
- [18] «EUR-Lex,» 17 Abril 2017. [En línea]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02009R1005-20170419>. [Último acceso: 22 Febrero 2022].
- [19] MARPOL 73/78 Artículos, protocolos, anexos e interpretaciones unificadas del Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973, modificado por el Protocolo de 1978.
- [20] I. Galarraga, P. Mason y A. Markandya, Instrumentos y políticas para la eliminación de productos que dañan la capa de ozono en el marco del Protocolo de Montreal, 2004.
- [21] «Organización Marítima Internacional,» [En línea]. Available <https://www.imo.org/es/MediaCentre/PressBriefings/Paginas/34-IMO-2020-sulphur-limit.aspx>. [Último acceso: 1 Febrero 2022].
- [22] P. I. B. Serrano y S. B. Monge, Guía Gestión Energética Puertos Firmada, SCRIBD, 2018.
- [23] «Una política energética para Europa,» 14 Marzo 2011. [En línea]. Available [http://bases.cortesaragon.es/bases/NDocumen.nsf/e86600a24e054a61c12576d2002e551c/5a96763536ff6653c1257855002fad42/\\$FILE/Una%20pol%C3%ADtica%20energ%C3%A9tica%20para%20Europa.pdf](http://bases.cortesaragon.es/bases/NDocumen.nsf/e86600a24e054a61c12576d2002e551c/5a96763536ff6653c1257855002fad42/$FILE/Una%20pol%C3%ADtica%20energ%C3%A9tica%20para%20Europa.pdf). [Último acceso: 13 Febrero 2022].
- [24] Directiva 2009/125/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, 2009.
- [25] Directiva 2010/30/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, 2010.
- [26] Directiva 2006/32/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, 2006.
- [27] PLAN NACIONAL INTEGRADO DE ENERGÍA Y CLIMA 2102-2030, 2020.
- [28] J. A. C. VILLAR, «La Responsabilidad Social Corporativa en las FAS,» Octubre 2010. [En línea]. Available: https://armada.defensa.gob.es/archivo/rgm/2012/01/Cap5_es.pdf. [Último acceso: 13 Febrero 2022].

- [29] L. V. Forms, Análisis de la nueva normativa OMI sobre EE (EEDI/SEEMP), 2012.
- [30] L. Estarellas Perales, P. Carrasco Pena, M. Á. Álvarez Feijoo, R. Fernández González y A. Suárez García, Eficiencia energética en buques de guerra. Análisis de datos de consumo y posibilidad de reducción, 2018.
- [31] P. Barros y A. Bravo, Historia de la Navegación, Sucesos, 2001.
- [32] C. S. Peinado, «Blogspot de C. S. Peinado,» 16 Diciembre 2012. [En línea]. Available <https://cspeinado.blogspot.com/2012/12/real-armada-espanola-navio-santisima.html>. [Último acceso: 29 Diciembre 2021].
- [33] R. C. Rebman, Robert Fulton's Steamboat, Minneapolis, Minnesota: Compass Point Books 2008.
- [34] J. A. R. PONCE, Sistemas de propulsión y clasificación de buques, Santa Cruz de Tenerife UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA, 2015.
- [35] O. Sanchez, «Pinterest,» [En línea]. Available <https://www.pinterest.com/pin/87398049003193633/>. [Último acceso: 31 Diciembre 2021].
- [36] D. Fernández, «Instituto Superior de Navegación,» 2020. [En línea]. Available <https://www.isndf.com.ar/los-nudos-marineros/>. [Último acceso: 25 Enero 2022].
- [37] J. R. Ú. Calvo, Análisis sistema propulsión del "Tabarca". Mantenimientos y mejora, Marín CUD UVigo, 2016.
- [38] «NauticEXPO,» Noruega, [En línea]. Available: <https://www.nauticexpo.es/prod/stadt/product/32120-200622.html>. [Último acceso: 18 Enero 2022].
- [39] J. M. J. Ariza, Modelado de un sistema híbrido, Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena 2016.
- [40] «Portal Morski,» 30 Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.portalmorski.pl/mstocznie-statki/46938-bezemisyjny-i-docelowo-autonomiczny-kontenerowiec-yara-birkeland-przekazany-przez-stocznie-varb>. [Último acceso: 18 Diciembre 2020].
- [41] «Tecnoparador,» [En línea]. Available https://www.tecnoparador.es/actividades/centrales/elementos_auxiliares.html. [Último acceso 23 Diciembre 2020].
- [42] F. S. Tudurí, Diseño y construcción de una turbina de gas, Barcelona, 2013.
- [43] «Pinterest,» [En línea]. Available: <https://www.pinterest.com/pin/674273375440321846/>. [Último acceso: 26 Diciembre 2020].
- [44] N. N. S. Administration, «United States Naval Nuclear Propulsion Program,» 2017.
- [45] «Nuclear Fission Blogspot,» 14 Abril 2012. [En línea]. Available: <http://nuclearfission.blogspot.com/2012/04/timeline-for-nuclear-power-development.html>. [Último acceso 27 Enero 2022].
- [46] M. Á. Á. Feijoo, Máquinas y Motores Navales, Pontevedra: CUD UVigo, 2021.
- [47] «Zona Militar,» 29 Octubre 2008. [En línea]. Available: <https://www.zonamilitar.com/foros/threads/clase-gowind.14681/>. [Último acceso: 27 Enero 2022].

- [48] P. Cervera, «F-110: esta es la fragata española que aspira a dominar el mundo,» El Confidencial 29 Marzo 2018.
- [49] Fenecom, «Fede.com,» 4 Abril 2018. [En línea]. Available http://fenecom1.blogspot.com/2018/04/tal-dia-como-hoy-entrega-de-la-fragata_4.html. [Último acceso: 27 Enero 2022].
- [50] J. Fernández, «El Confidencial,» 31 Agosto 2020. [En línea]. Available https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2020-08-31/mar-egeo-arsenal-turquia-grecia-conflicto_2728563/. [Último acceso: 27 Enero 2022].
- [51] «Base mforos,» 13 Enero 2007. [En línea]. Available <https://base.mforos.com/1167624/5412516-destructores-tipo-42-clase-sheffield/>. [Último acceso: 27 Enero 2022].
- [52] «Base mforos,» [En línea]. Available: <https://base.mforos.com/1716038/3448624-destructores-tipo-county-dlh-11-prat-dlh-12-cochrane-dlh-15-blanco-y-dlg-14-latorre/?pag=3>. [Último acceso: 27 Enero 2022].
- [53] «Un reconocimiento a León a través de una fragata F110 de la Armada Española,» Leonoticias 2019.
- [54] «Galaxia Militar,» 7 Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://galaxiamilitar.es/primeras-pruebas-de-mar-para-la-fragata-de-defensa-aerea-fremm-alsace-de-la-armada-francesa/>. [Último acceso: 27 Enero 2022].
- [55] «LQT Defensa,» 8 Agosto 2013. [En línea]. Available: <https://www.lqtdefensa.es/2013/08/el-bam-meteoro-se-integra-en-la.html>. [Último acceso: 27 Enero 2022].
- [56] «Pinterest,» 24 Marzo 2004. [En línea]. Available <https://www.pinterest.com/pin/388787380329302989/>. [Último acceso: 3 Febrero 2022].
- [57] «lancerdefense,» 18 Agosto 2009. [En línea]. Available <https://greenstop.shop/gr/rty/index.php?lpkey=16d5436a906d770450&language=es-ES&uclick=b7a6bg0&uclickhash=b7a6bg0-b7a6bg0-fy0-0-qqbl-gm17-gmgx-29c10f>. [Último acceso: 3 Febrero 2022].
- [58] Manual Técnico fragatas tipo F-100. Planta propulsora, proyecto y procesos de funcionamiento. 2002.
- [59] C. R. H. Roca, «Estudio del ciclo de vida de las fragatas clase "Álvaro de Bazán" F-100,» Marzo 2016. [En línea]. Available <http://calderon.cud.uvigo.es/bitstream/handle/123456789/91/HernandezRoca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 3 Febrero 2022].
- [60] U. NAVY, Detail Specification Fuel Naval Distillate (NATO F-76), 2017.
- [61] «CEPSA,» 18 Noviembre 2021. [En línea]. Available https://www.cepsa.es/portal/site/comercial/template.BINARYPORTLET/Fichas_De_Seguridad/resource.process/?javax.portlet.tpst=5892cfaa9a3d72d589a39feaa810e1ca&javax.portlet.prp_5892cfaa9a3d72d589a39feaa810e1ca=compania%3D%26enviar%3Dtrue%26action%3Dpdf&javax. [Último acceso: 6 Febrero 2022].
- [62] «EverySpec,» Agosto 2018. [En línea]. Available: http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-3000-9999/MIL-STD-3004_22929/#:~:text=MIL-STD-3004%2C%20DEPARTMENT%20OF%20DEFENSE%20STANDARD%20PRACTICE%3A

- %20QUALITY%20ASSURANCE%2FSURVEILLANCE,are%20covered%20by%20requirements%20contained%20in%20the%20contract.. [Último acceso: 8 Febrero 2022].
- [63] «Enerdata,» 2022. [En línea]. Available: <https://datos.enerdata.net/petroleo-crudo/balance-mundial-crudo-comercio.html>. [Último acceso: 21 Febrero 2022].
- [64] «Blogspot,» [En línea]. Available: http://4.bp.blogspot.com/pJodi6QNDtA/UB6ncHvj_eI/AAAAAAAAAOWQ/oiLpA3EBHSo/s1600/biodiesel_meroil2.jpg. [Último acceso: 9 Febrero 2022].
- [65] X. B. Piñeiro, Obtención de biodiesel a partir de aceite de cocina usado de la ENM, Marin: CUI UVigo, 2015.
- [66] D. K. E. L. B. L. K. G. Dimitrios M. Korres, Aviation fuel JP-5 and biodiesel on a diesel engine ELSEVIER, 2008.
- [67] K. Sund y A. Whitefield, Gas prices today and going forward, 2014.
- [68] «CORE LNGas hive,» [En línea]. Available: <http://corelngashive.eu/es/sobre-el-proyecto/> [Último acceso: 15 Febrero 2022].
- [69] «European Comission,» [En línea]. Available: <https://trimis.ec.europa.eu/project/sf-samuelng-blue-atlantic-arch>. [Último acceso: 15 Febrero 2022].
- [70] E. C. Rozalem, Estudio de la propusión a gas en buques militares. Aplicabilidad a la Armada Española, 2021.
- [71] E. S.A, LNG Market Study: Bottom Up Analysis, 2018.
- [72] «LNGhive,» 2021. [En línea]. Available: <https://lnghive.com/barcos-a-gnl/>. [Último acceso: 24 Febrero 2022].
- [73] «defensa,» 7 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.defensa.com/espana/navantia-ha-disenado-nuevo-buque-logistico-para-ejercito-tierra>. [Último acceso: 24 Febrero 2022].
- [74] J. M. -. R. M. -. J. G.-M. -. J. P. -. M. Bernal, De Residuo a Recurso El Camino hacia la Sostenibilidad, Compostaje Red Española, 2016.
- [75] M. Y. H. Huahualuque y T. C. S. Moya, Estado del arte sobre la producción de biogás mediante la gestión anaerobia como parte del aprovechamiento de la biomasa residual pecuaria, 2020.
- [76] «biodisol,» 2010. [En línea]. Available: <https://www.biodisol.com/que-es-el-biogas-digestion-anaerobia-caracteristicas-y-usos-del-biogas/digestion-anaerobia-proceso-de-produccion-de-biogas-biocombustibles-energias-renovables/#:~:text=1%20Digesti%C3%B3n%20anaerobia.%20Proceso%20de%20producci%C3%B3n>. [Último acceso: 29 Enero 2022].
- [77] J. E. ARANGO GÓMEZ, F. E. SIERRA VARGAS y V. SILVA LEAL, Análisis exploratorio de investigaciones sobre los motores de combustión interna que trabajan con biogás.
- [78] A. R. Machado, Tecnologías para la Producción y Uso de Biogás y Biometano, 2018.
- [79] T. Patterson, Una evaluación de la política y los factores tecnoeconómicos que afectan e potencial de mejora del biogás para el uso de combustible de transporte en el Reino Unido, 2011

- [80] «Gasnam,» 2022. [En línea]. Available: <https://gasnam.es/terrestre/mapa-de-plantas-de-produccion-de-biometano/>. [Último acceso: 17 Febrero 2022].
- [81] U. Europea, «IDAE,» 10 Octubre 2021. [En línea]. Available https://sede.idae.gob.es/lang/extras/tramites-servicios/2020/Apoyo_EERR/TER_CAT_ACTA_FAdj_2b2021092311173307E3A1C13307E3A1C100000004.pdf. [Último acceso: 17 Febrero 2022].
- [82] «California Air Resources Board,» 2021. [En línea]. Available <https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/lcfs-pathway-certified-carbon-intensities>. [Último acceso: 17 Febrero 2022].
- [83] IDAE, SITUACIÓN Y POTENCIAL DE GENERACIÓN DE BIOGAS, 2011-2020.
- [84] «Guía del Gas,» 22 Febrero 2022. [En línea]. Available <https://guiadelgas.com/alternativos/europa-explora-el-biometano-como-alternativa-a-la-crisis-energetica/>. [Último acceso: 24 Febrero 2022].
- [85] «Hosteltur,» 18 Junio 2019. [En línea]. Available https://www.hosteltur.com/comunidad/nota/019150_hurtigruten-se-convierte-en-la-primera-compania-que-navegara-con-biogas.html. [Último acceso: 17 Febrero 2022].
- [86] R. Gimeno, «NIUS,» 29 Agosto 2021. [En línea]. Available https://www.niusdiario.es/economia/macroeconomia/decision-verde-maersk-naviera-quiere-ser-tractor-inversion-buque-biometano-combustible-transicion-energetica-transporte-maritimo_18_3193321565.html. [Último acceso: 24 Febrero 2022].
- [87] «CMA CGM,» 8 Abril 2021. [En línea]. Available: <https://cmacgm-group.com/en/news-media/CMA-CGM-launches-the-first-low-carbon-shipping-offer-by-choosing-biomethane>. [Último acceso: 24 Febrero 2022].
- [88] «ANAVE Asociación de Navieros Españoles,» 3 Junio 2021. [En línea]. Available <https://www.anave.es/prensa/ultimas-noticias/2735-primer-viaje-con-biometano-de-origen-100-renovable-del-eleanor-roosevelt>. [Último acceso: 24 Febrero 2022].
- [89] J. Rico, «Energías Renovables,» 24 Julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.energias-renovables.com/bioenergia/barcazas-con-biometano-para-el-abastecimiento-de-20200719>. [Último acceso: 24 Febrero 2022].
- [90] M. A. Peralta, Eliminación de contaminantes de gases de escape de motores diesel: Estabilidad de catalizadores, Universidad Nacional del Litoral Facultad de Ingeniería Química.
- [91] B. P. Moreno, Analisis del proceso de la recirculación de los gases de escape de baja presión en motores diesel sobrealimentados, Valencia: Universidad Politecnica de Valencia, 2009.
- [92] J. Deng, X. Wang, Z. Wei, L. Wang, C. Wang y Z. Chen, A review of NO_x and SO_x emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels, 2021.
- [93] R. J. Miller, «The consequence of WID is that the fluid mud layer formed is confined to the channel,» ScienceDirect, 2020.
- [94] H. Ricklefs y S. Baer, The cost-efficiency of water-based marine emission abatement, 2013.
- [95] B. M. T. F. Y. Hai Mei, «A new method for obtaining ultra-low sulfur diesel fuel via ultrasound assisted oxidative desulfurization,» ELSEVIER, vol. 82, 2003.

- [96] «Hielscher Ultrasound Technology,» [En línea]. Available https://www.hielscher.com/es/i16000_p.htm. [Último acceso: 9 Febrero 2022].
- [97] S. M. Learreta, Estudio de los sistemas de reducción de NO_x y análisis del comportamiento de sistema SCR en el simulador MC90-V, País Vasco : Universidad del País Vasco, 2017.
- [98] R. P. Díaz, Sistema de Reducción Catalítica Selectiva, Universidad de La Laguna, 2021.
- [99] S. B. PÉREZ, Sistema SCR para el control de emisiones, La Coruña: Escola Técnica Superior de Náutica, 2021.
- [100] «MCAT,» [En línea]. Available: <https://mcat.com.mx/scrubber/>. [Último acceso: 27 Enero 2022].
- [101] DNV.GL, Focus on Scrubbers, Global sulphur CAP 2020, 2020.
- [102] «International Maritime Organization,» [En línea]. Available <https://web.archive.org/web/20200809092505/http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Index-of-MEPC-Resolutions-and-Guidelines-related-to-MARPOL-Annex-VI.aspx>. [Último acceso: 27 Enero 2022].
- [103] H. E.Lindstad, Environmental regulations in shipping: Policies leaning towards globalization o scrubbers deserve scrutiny, 2016.
- [104] «Ship Management,» 9 Septiembre 2009. [En línea]. Available <https://shipmanagementinternational.com/dnv-certifies-the-first-maritime-sox-exhaust-gas-scrubber/>. [Último acceso: 27 Enero 2022].
- [105] BP Energy Outlook 2017 Edition.
- [106] C. M. Noor, M. Noor y R. Mamat, Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review, 2018.
- [107] «Metrohm,» [En línea]. Available <https://www.metrohm.com/es/industrias/petro/biocombustibles#>. [Último acceso: 26 Febrero 2022].
- [108] «chemanalyst,» Enero 2022. [En línea]. Available: <https://www.chemanalyst.com/Pricing/data/biodiesel-77>. [Último acceso: 25 Febrero 2022].
- [109] M. P. Nayyar, The Use of Biodiesel Fuels in the U.S. Marine Industry, 2010.
- [110] R. L. McCormick, Deployment Issues for Biodiesel: Fuel Quality and Emission Impacts National Renewable Energy Laboratory, 2007.
- [111] «NESTE,» 28 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://www.neste.com/investors/market-data/biodiesel-prices-sme-fame#d061e8fd>. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [112] S. Rennie, Cost benefit analysis of biodiesel use in local fleets, LONDON, 2016.
- [113] J. A. Borque, «Libertad Digital,» 11 Octubre 2012. [En línea]. Available <https://www.libertaddigital.com/espana/2012-10-11/las-fragatas-f100-espanolas-sin-capacidad-para-estar-en-el-escudo-antimisiles-1276471167/>. [Último acceso: 2 Marzo 2022].
- [114] Technical Courses, 2018.

- [115] M. LAMAS y C. RODRIGUEZ, Emissions form Marine Engines and NOx Reduction Methods 2012.
- [116] p. Fernandez Díez, Sistema de funcionamiento del catalizador SCR, 2018.
- [117] A. M. Techniques, SCR fleet review.
- [118] «IACCSEA,» 6 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://www.iaccsea.com/marine-scr/>. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [119] J. D. d. Paz y Á. M. P. Suárez, Planta de tratamiento de gases de salida de un buque, 2015.
- [120] F. M. D. LOECHES, «naucher,» 2021. [En línea]. Available <https://www.naucher.com/combustibles-en-2021-el-tiempo-de-los-scrubbers/>. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [121] CIMAC, Guideline for the operation of marine engines on low sulphur diesel, 2013.
- [122] Wartsila, Scrubbers system, 2018.
- [123] «MFAME,» 16 Abril 2020. [En línea]. Available: <https://mfame.guru/things-to-know-before-purchasing-a-scrubber-system-for-your-ship/>. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [124] L. E. Perales, Eficiencia energética en buques de guerra. Análisis de datos de consumo de un buque de guerra y posibilidades de reducción, 2018.
- [125] N. B. Ramón, Análisis medioambiental del proceso de limpieza de los gases de escape en buque mercantes, 2020.
- [126] J. J. G. Pérez, Biogás y biometano como vectores energéticos, 2019.
- [127] Piraeus, Principles of Marine Main Engines running on LNG, 2015.
- [128] «GASNAM,» 2020. [En línea]. Available: <https://gasnam.es/maritimo/motores-marinos-a-gas-natural/>. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [129] R. R. Marine, 2016.
- [130] «HBM,» [En línea]. Available: <https://www.hbm.com/es/6518/waertsila-uso-de-gas-natural-como-combustible-de-motores-marinos/>. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [131] MARINTEK, MARINTEK and the Safe and Efficient LNG Sea Transport, Trondheim, 2004.
- [132] «Puerto Canarias,» 3 Septiembre 2020. [En línea]. Available <https://puertocanarias.com/es/node/3537>. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [133] A. F. Jofre y X. F. Ripoll, Los gases renovables. Un vector energético emergente, 2019.
- [134] «MIBGAS,» [En línea]. Available https://www.mibgas.es/sites/default/files/20220309_mibgas_diario.pdf. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [135] A. B. Martí, Estudio de viabilidad de la instalación de una planta de metanización en un buque crucero, Barcelona, 2011.
- [136] NAVANTIA, F-110 La Navantia del siglo XXI.
- [137] Boletín Técnico de Ingeniería, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Armas Navales, 2021

- [138] «Sensorex,» [En línea]. Available: <https://sensorex.com/wet-scrubbers/>. [Último acceso: 2' Enero 2022].

ANEXO I: SIMILITUDES Y DIFERENCIAS ENTRE F-110 Y F-100

En este anexo se pretende resaltar las principales diferencias y similitudes entre la F-100 y la futura F-110, en términos medioambientales y económicos. En la siguiente Figura A - 1 se puede ver la principal diferencia con la F-100 y los BAM (Buque de Acción Marítima), pues la F-110 será un híbrido entre un BAM y una F-100, con importantes capacidades de combate en todas las áreas, destacando la guerra submarina. Capacidad que actualmente está obsoleta en la Armada Española. Están destinadas a ser el relevo de las F-80 [136].



Figura A - 1 Propósito de la F-110 [136]

Se ha aprobado un presupuesto de 4.300 millones de € para las 5 F-110 que van a ser construidas entre 2023-2030. Este programa genera 590 millones de € anuales al PIB español con 7000 empleos. Garantizando una carga de trabajo de 10 años para Navantia.

Con respecto a emisiones, un buque de guerra, no está obligado a cumplir con las restricciones, pero se puede proponer su cumplimiento. Esto se realiza mediante los denominados Certificados de Cumplimiento Voluntario MARPOL. La consideración como “CleanShip” en el Bureau Veritas (compañía global que inspecciona y certifica los diferentes buques en cuestiones de calidad, salud, seguridad, protección medioambiental y responsabilidad social) va a acreditar a la F-110 con el cumplimiento del convenio MARPOL en los siguientes puntos:

- Gestión de residuos (anexos I, V y VI)
- Aguas aceitosas (anexo I)
- Aguas residuales (anexo IV)
- Basura y desechos peligrosos (anexo V)
- Sistemas anti-incrustantes de casco (Anti-Fouling Systems)
- Prevención de derrames y fugas de hidrocarburos (anexo I)
- Sistemas de refrigeración (regla 12 anexo VI)
- Sistemas contra-incendios (regla 12 anexo VI)
- Emisión de NO_x para el control de motores diésel marinos (regla 13 anexo VI)
- Emisión de SO_x para el muestreo de combustibles diésel (regla 14 y 18 anexo VI)

Se sabe además que un buque de guerra moderno necesita de altas velocidades, pero pasa el 85% de su ciclo de vida navegando a velocidad de crucero. Se ha intentado aplicar la eficiencia energética a las plantas propulsoras de los buques de guerra para reducir sus consumos y horas de funcionamiento a través de sistema propulsores modernos. En la siguiente Figura A - 2 se puede ver el sistema CODELAG de la F-110, con 4 motores diésel generadores y una sola turbina de gas a diferencia de la F-100.

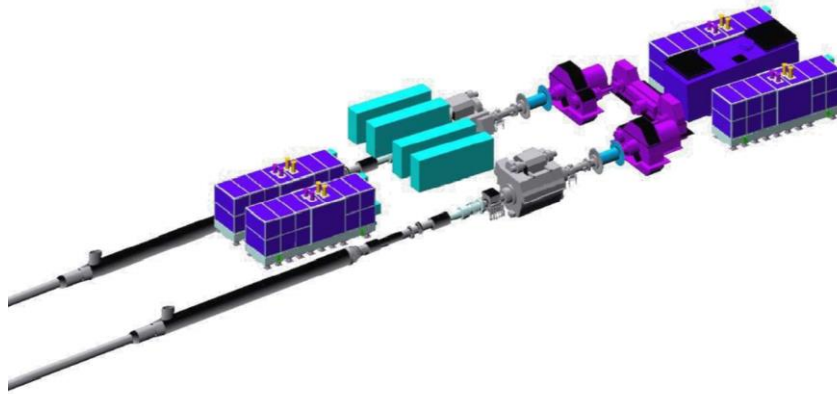


Figura A - 2 Sistema propulsión CODELAG F-110 [136]

El tipo de propulsión (eléctrica o diésel-eléctrica), se selecciona en función de la demanda de la velocidad operativa, mientras que se reserva las velocidades superiores para la turbina de gas. Hay que tener en cuenta que el cumplimiento del anexo VI puede afectar al rendimiento del buque, quedando descartada la turbina de gas.

Control de emisiones SO_x:

Este control lo realiza del mismo modo que la F-100, controlando el porcentaje masa/masa no supere el 0,1% de azufre. El F-76 tiene un porcentaje de 0,0015%, esto se cumplirá siempre y cuando se emplee este combustible.

Control de emisiones NO_x:

Los niveles Tier I y II son alcanzables mediante procesos de optimización de la combustión, en cambio para cumplir el Tier III. Es necesario la adquisición de tratamiento de gases de escape para cumplir con este requisito.

Como se puede ver, no existe gran diferencia entre la F-110 y la F-100 en lo que a contaminación se refiere, ambas unidades no cumplen el Tier III del NO_x. Porque ambas necesitan de algún sistema para cumplir este requisito. Lo que si se puede decir con seguridad es que las emisiones de la F-110 es menor ya que su régimen de revoluciones de los motores generadores es constante y no varía, por lo que no se producirían picos de consumo, esto ha permitido que esta fragata sea más medioambiental. En la siguiente Figura A - 3 se puede observar los distintos certificados que van a ser otorgados para la F-110 por parte de su compromiso por el medio ambiente y la eficiencia energética [137].



Figura A - 3 Certificados para la F-110 [137]

A continuación, se citan las principales ventajas y desventajas del sistema CODELAG de la F-110.

VENTAJAS

- ✓ La principal ventaja reside en el control de ruidos, ya que los ejes del buque forman parte del rotor de los motores eléctricos sin necesidad de ningún sistema reductor. Reduce de una forma considerable los ruidos producidos en la propulsión. Otorgando ventajas submarinas como protección de la flora marina.
- ✓ Una mayor autonomía, no existen motores propulsores sino diésel generadores trabajando en condiciones de carga estables. Haciendo que el gasto del combustible sea mucho más eficiente.
- ✓ Aumenta la fiabilidad de sus elementos, los motores eléctricos no necesitan de grandes esfuerzos mecánicos y tampoco de sistemas complejos de refrigeración, lubricación y sistemas transmisores de potencia. También la turbina, al encontrarse en rangos de trabajo superiores y no de uso normal, ofrece un tiempo de vida mucho mayor.
- ✓ La disposición de los motores eléctricos en la salida de la caja de engranajes, alivia los esfuerzos a los que son sometidos, alargando así su vida útil.
- ✓ Este tipo de propulsión no solo supone un avance táctico, sino también logístico. Al eliminar todos los elementos intermedios entre el sistema propulsor y la salida de potencia del eje. Reduciendo de forma considerable sus mantenimientos.

DESVENTAJAS

- La principal duda de este sistema es si habrá suficiente energía disponible para el eje. En condiciones ideales, para contar con la potencia máxima en el eje, se requiere el 100% de la planta, es decir, se deben acoplar los 4 generadores para que los motores eléctricos desarrollen toda su potencia. Esto significa que si se requiere de una velocidad mayor a 17 nudos se debe pasar a propulsión por turbina o tener acoplados los 4 generadores.
- Teniendo en cuenta que los motores eléctricos son más potentes que los motores diésel, no es posible establecer un ruido bajo en la planta eléctrica. Si se intenta establecer la condición de máximo silencio navegando a esta potencia, la potencia suministrada no alcanzaría para los cuadros de alimentación y se produciría un black out (apagón) del buque. Por lo que no se puede establecer la condición de máximo silencio a partir de los 17 nudos.

- La respuesta de un motor eléctrico no es tan rápida como la que ofrece un sistema convencional debido a sus picos de aceleración y deceleración. Mermando su respuesta en situaciones críticas, como puede ser un aprovisionamiento en la mar o formaciones en grupos OTAN.
- El disponer de una sola turbina, hace que la dependencia hacia esta sea total. Si esta se ve averiada, es imposible aumentar más de 20 nudos la velocidad.
- El sistema de control arroja dudas sobre su fiabilidad con el paso del tiempo. Este sistema está formado por apartados complejos, con niveles de automatización altos y protocolos protegidos. El acceso a este equipo no está permitido en su totalidad para la dotación del buque, por lo que, si hay un fallo en las secuencias de automatización, la única solución será informar del fallo y esperar a la llegada a puerto o embarque de personal cualificado para este cometido.
- Finalmente, las F-100 tienen dos motores diésel B12, uno por eje. Desarrollando una potencia de 8.500 kW. En base a la experiencia del personal de estas unidades, el modo diésel no es capaz de superar los 14 nudos de velocidad. Las F-110 tendrán una potencia de 6.800 kW, alcanzando una velocidad máxima de 17 nudos con este sistema. Comparando esta potencia y velocidad con la F-100, se duda si realmente puede alcanzar la F-110 una velocidad de 17 nudos, ya que existe una diferencia de 1.700 kW de potencia y el desplazamiento de la F-110 es mayor que el de la F-100.