



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de la propulsión a gas en buques militares.  
Aplicabilidad a la Armada Española*

## Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** Eduardo Corral Rozalem

**DIRECTORES:** Guillermo Lareo Calviño

**CURSO ACADÉMICO:** 2020-2021

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de la propulsión a gas en buques militares.  
Aplicabilidad a la Armada Española*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

UniversidadeVigo



## **RESUMEN**

Las últimas décadas han puesto de manifiesto la necesidad de adaptarse a estándares medioambientales en todos los ámbitos, con exigencias en lo que a emisiones se refiere cada vez más estrictas. La propulsión de buques, en particular militares, no es ajena a esta problemática, y las necesidades de propulsión tanto de buques actualmente operativos como de aquellos que se puedan proponer en un futuro próximo, se deben ir adaptando al contexto energético-ambiental existente.

Con este trabajo se pretende realizar un estudio del estado del arte de la propulsión a gas, que en la última década ha experimentado un crecimiento considerable, haciendo énfasis en el mundo naval militar. En particular se pretende poner en perspectiva la idoneidad de la posible adaptación de la propulsión de los buques actuales y futuros de la Armada Española a una propulsión basada en Gas Natural Licuado como combustible.

## **PALABRAS CLAVE**

Propulsión, Gas, Turbina, Gas Natural Licuado, Armada Española



## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero mostrar mi más sincero agradecimiento a mi familia y amigos, por su apoyo incondicional durante todos estos años en la Escuela Naval.

A mis compañeros de promoción, por hacer de esta etapa en la Escuela Naval una singladura plagada de grandes momentos y alegrías que jamás podré olvidar.

Y a mi tutor, por sus consejos e indicaciones que han servido de guía y motivación durante el desarrollo de todo el trabajo.



## CONTENIDO

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Contenido .....                                                          | 1  |
| Índice de Figuras .....                                                  | 3  |
| Índice de Tablas.....                                                    | 7  |
| 1 Introducción y objetivos .....                                         | 9  |
| 1.1 Introducción y motivación .....                                      | 9  |
| 1.2 Objetivos .....                                                      | 9  |
| 1.3 Estructura del trabajo .....                                         | 10 |
| 1.4 Abreviaturas .....                                                   | 11 |
| 2 Antecedentes .....                                                     | 13 |
| 2.1 Perspectiva histórica .....                                          | 13 |
| 2.2 Sistemas de propulsión convencional actuales .....                   | 15 |
| 2.2.1 Turbinas de vapor .....                                            | 15 |
| 2.2.2 Motores diésel.....                                                | 16 |
| 2.2.3 Turbinas de gas .....                                              | 17 |
| 2.2.4 Motores eléctricos.....                                            | 18 |
| 2.2.5 Plantas propulsoras combinadas .....                               | 19 |
| 2.2.6 Sistemas alternativos .....                                        | 24 |
| 3 Estado del arte .....                                                  | 29 |
| 3.1 La turbina de gas en la propulsión naval.....                        | 29 |
| 3.1.1 Evolución.....                                                     | 29 |
| 3.1.2 Tipos de turbinas empleadas actualmente .....                      | 30 |
| 3.1.3 LM-2500 .....                                                      | 33 |
| 3.1.4 Ventajas e inconvenientes de la propulsión con turbina de gas..... | 41 |
| 3.1.5 La turbina de gas en la Armada Española .....                      | 42 |
| 3.2 Propulsión mediante GNL .....                                        | 43 |
| 3.2.1 ¿Qué es GNL?.....                                                  | 44 |
| 3.2.2 ¿Por qué GNL? .....                                                | 44 |
| 3.2.3 Alternativas al GNL.....                                           | 47 |
| 3.2.4 Proyectos e iniciativas GNL internacionales .....                  | 50 |
| 3.2.5 Tipos de motores propulsados por GNL.....                          | 53 |
| 3.2.6 Estado actual de la propulsión con GNL .....                       | 55 |
| 3.2.7 Refueling de GNL.....                                              | 56 |
| 4 Aplicabilidad a la Armada Española .....                               | 61 |

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 Acondicionamiento de buques a propulsión a gas .....        | 61 |
| 4.1.1 Ejemplo de acondicionamiento del ferry Abel Matutes ..... | 63 |
| 4.2 Estaciones de regasificación y "bunkering" en España .....  | 64 |
| 4.2.1 Estaciones de regasificación .....                        | 64 |
| 4.2.2 Operaciones de "bunkering" en España en 2020.....         | 67 |
| 4.3 Empleo del GNL en las Marinas de Guerra .....               | 68 |
| 4.3.1 Política de emisiones de la Armada Española .....         | 68 |
| 4.3.2 Buques militares con GNL .....                            | 69 |
| 4.4 Estado actual de los buques Armada Española .....           | 70 |
| 4.5 Futuro de la propulsión .....                               | 72 |
| 4.6 Implementación en la Armada ¿Sí o no? .....                 | 73 |
| 4.6.1 Factores de apoyo a la apuesta por el GNL .....           | 73 |
| 4.6.2 Estudio básico de viabilidad económica .....              | 74 |
| 4.6.3 Adaptación de buques actuales de la Armada .....          | 74 |
| 4.6.4 Buques de nueva construcción.....                         | 75 |
| 5 Conclusiones y líneas futuras .....                           | 79 |
| 5.1 Conclusiones y cumplimiento de objetivos .....              | 79 |
| 5.2 Líneas futuras .....                                        | 80 |
| 6 Bibliografía.....                                             | 81 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1 Mapa sinóptico del TFG (autoría propia) .....                                                                                                     | 11 |
| Figura 2-1 Trirreme griego [2] .....                                                                                                                         | 13 |
| Figura 2-2 Nao Victoria 1515 [3] (izquierda) y Santísima Trinidad 1769 [4] (derecha) .....                                                                   | 14 |
| Figura 2-3 El Clermont 1807 [5] .....                                                                                                                        | 14 |
| Figura 2-4 Esquema básico de una planta propulsora [7] .....                                                                                                 | 15 |
| Figura 2-5 Esquema de funcionamiento de una Turbina de Vapor (autoría propia) .....                                                                          | 15 |
| Figura 2-6 BAP Almirante Grau [9] .....                                                                                                                      | 16 |
| Figura 2-7 Motor diésel marino 2-t Wartsila RT-Flex [10] .....                                                                                               | 16 |
| Figura 2-8 BAC Cantabria (Armada Española) [12] .....                                                                                                        | 17 |
| Figura 2-9 Esquema del Ciclo Brayton en una Turbina de Gas (autoría propia) .....                                                                            | 17 |
| Figura 2-10 BNS Greenhalgh (Marinha do Brasil) [15] .....                                                                                                    | 18 |
| Figura 2-11 USS Zumwalt (United States Navy) [18] .....                                                                                                      | 19 |
| Figura 2-12 Eficiencia térmica de motores diésel y a gas [19] .....                                                                                          | 19 |
| Figura 2-13 Esquema planta CODOG (autoría propia) .....                                                                                                      | 20 |
| Figura 2-14 Esquema planta CODAG (autoría propia) .....                                                                                                      | 20 |
| Figura 2-15 Esquema planta CODAD (autoría propia) .....                                                                                                      | 21 |
| Figura 2-16 Esquema planta COGAG (autoría propia) .....                                                                                                      | 21 |
| Figura 2-17 Esquema planta COGOG (autoría propia) .....                                                                                                      | 22 |
| Figura 2-18 Esquema planta COSAG (autoría propia) .....                                                                                                      | 22 |
| Figura 2-19 Esquema planta CODELAG (autoría propia) .....                                                                                                    | 23 |
| Figura 2-20 Esquema planta CODLOG (autoría propia) .....                                                                                                     | 23 |
| Figura 2-21 Esquema planta CODOE (autoría propia) .....                                                                                                      | 24 |
| Figura 2-22 Reparto de plantas propulsoras por tipos de buques a nivel mundial [20] .....                                                                    | 24 |
| Figura 2-23 Principio Magnetohidrodinámico [21] .....                                                                                                        | 25 |
| Figura 2-24 Yamato – 1 [22] .....                                                                                                                            | 25 |
| Figura 2-25 Efecto Magnus [23] .....                                                                                                                         | 25 |
| Figura 2-26 E-Ship 1 con rotores Flettner [24] .....                                                                                                         | 26 |
| Figura 2-27 Principio de funcionamiento del “Hidrojet” [16] .....                                                                                            | 26 |
| Figura 2-28 Corbeta clase Visby de la Marina Real Sueca [25] .....                                                                                           | 27 |
| Figura 2-29 Principio de funcionamiento y motor Voith-Schneider [16] .....                                                                                   | 27 |
| Figura 2-30 Cazaminas Turia de la Armada Española [12] .....                                                                                                 | 27 |
| Figura 3-1 Eolipila de Herón [26] .....                                                                                                                      | 29 |
| Figura 3-2 Bocetos de la cocina de Da Vinci (izquierda) [27], la turbina a chorro de Branca (centro) [28] y el vagón de vapor de Newton (derecha) [29] ..... | 30 |
| Figura 3-3 Turbina de gas de John Barber [30] .....                                                                                                          | 30 |

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3-4 Gráfica de modelos de turbinas de gas, potencia y velocidad media [31].....           | 31 |
| Figura 3-5 Depósitos de servicios mundiales de General Electric (autoría propia basado en [31])  | 32 |
| Figura 3-6 Crucero Queen Mary 2 [32].....                                                        | 32 |
| Figura 3-7 Ship-to-Shore Connector Hovercraft (US Navy) [18].....                                | 33 |
| Figura 3-8 Módulo de la turbina LM2500 [34] .....                                                | 34 |
| Figura 3-9 Esquema general de la turbina LM2500 (autoría propia).....                            | 34 |
| Figura 3-10 Ciclo de Brayton teórico en una turbina de gas [35] .....                            | 34 |
| Figura 3-11 Esquema de funcionamiento de la turbina (autoría propia).....                        | 35 |
| Figura 3-12 Estructura de la base de la turbina LM2500 [34] .....                                | 35 |
| Figura 3-13 Sistema de anclaje de la turbina LM2500 [34].....                                    | 36 |
| Figura 3-14 Módulo del contenedor y mamparo barrera de la turbina LM2500 [34].....               | 36 |
| Figura 3-15 Compresor de la turbina LM2500 [34] .....                                            | 37 |
| Figura 3-16 Cámara de combustión de la turbina LM2500 [34].....                                  | 37 |
| Figura 3-17 Domo y camisa exterior de la turbina LM2500 [34] .....                               | 38 |
| Figura 3-18 Turbina de Alta Presión de la turbina LM2500 [34] .....                              | 38 |
| Figura 3-19 Rotor y estator de la turbina de Potencia de la turbina LM2500 [34] .....            | 39 |
| Figura 3-20 Bastidor frontal y sistema de transmisión de accesorios de la turbina LM2500 [34]... | 39 |
| Figura 3-21 Bastidor trasero del compresor de la turbina LM2500 [34] .....                       | 40 |
| Figura 3-22 Bastidor central de la turbina LM2500 [34] .....                                     | 40 |
| Figura 3-23 Bastidor trasero de la turbina LM2500 [34] .....                                     | 40 |
| Figura 3-24 Fragata Numancia (F-83) de la Armada Española [12].....                              | 42 |
| Figura 3-25 Fragata Blas De Lezo (F-103) de la Armada Española [12] .....                        | 42 |
| Figura 3-26 Prototipo de las futuras fragatas F-110 de la Armada Española [36] .....             | 42 |
| Figura 3-27 Planta propulsora del LHD Juan Carlos I (L-61) de la Armada Española [12].....       | 43 |
| Figura 3-28 Esquema conceptual del GNL (autoría propia) .....                                    | 44 |
| Figura 3-29 Rutas marítimas comerciales a nivel global [37].....                                 | 44 |
| Figura 3-30 Gráfica de reducción de emisiones al emplear GNL (autoría propia basado en [38])     | 45 |
| Figura 3-31 Comparativa de precios de distintos combustibles con el GNL [39] .....               | 45 |
| Figura 3-32 Mapa mundial con la distribución de las ECA´s [40] .....                             | 46 |
| Figura 3-33 Gráfica de los límites de emisiones SOx (autoría propia basado en [41]).....         | 46 |
| Figura 3-34 Gráfica de los límites de emisiones NOx [42].....                                    | 47 |
| Figura 3-35 Scrubber de ciclo abierto [43] .....                                                 | 48 |
| Figura 3-36 Scrubber de ciclo cerrado [43].....                                                  | 48 |
| Figura 3-37 Scrubber híbrido [43].....                                                           | 49 |
| Figura 3-38 Scrubber de tipo seco [43] .....                                                     | 49 |
| Figura 3-39 Evolución del mercado actual de IFO-380 y VLSFO [44].....                            | 50 |

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3-40 Principales barreras del GNL (autoría propia basado en [46]) .....                | 51 |
| Figura 3-41 Mapa de la Península Ibérica con actividad CORE LNGas hive [47].....              | 52 |
| Figura 3-42 Samuel de Champlain (Francia) antes y después de su remotorización [48] .....     | 52 |
| Figura 3-43 Mercado del GNL en puertos, navieras y armadores (autoría propia basado en [46]). | 53 |
| Figura 3-44 Ciclos del motor LBSI [49] .....                                                  | 53 |
| Figura 3-45 Motor B35:40 de Rolls-Royce [33] .....                                            | 54 |
| Figura 3-46 Ciclos del motor Dual Fuel [49] .....                                             | 54 |
| Figura 3-47 Motor 50DF [50] y buque Bit Viking [51] .....                                     | 54 |
| Figura 3-48 Ciclos del motor de Inyección Directa a Elevada Presión [49] .....                | 55 |
| Figura 3-49 Motor MAN B&W ME-GI [50] y buque Clase Marlin [52] .....                          | 55 |
| Figura 3-50 Buques GNL en la actualidad (autoría propia basado en [53]) .....                 | 56 |
| Figura 3-51 Distribución de los buques GNL según tipo (autoría propia basado en [53]) .....   | 56 |
| Figura 3-52 Simplificación de la cadena logística del GNL (autoría propia) .....              | 57 |
| Figura 3-53 Representación de las métodos actuales de realizar el "bunkering" [55].....       | 58 |
| Figura 4-1 Mapa sinóptico del apartado (autoría propia).....                                  | 61 |
| Figura 4-2 Acondicionamiento del buque al GNL (autoría propia).....                           | 62 |
| Figura 4-3 Ferry Abel Matutes [58] .....                                                      | 63 |
| Figura 4-4 Estaciones de regasificación en España (autoría propia).....                       | 64 |
| Figura 4-5 Planta de regasificación de Barcelona [59] .....                                   | 64 |
| Figura 4-6 Planta de regasificación de Huelva [59] .....                                      | 65 |
| Figura 4-7 Planta de regasificación de Cartagena [59] .....                                   | 65 |
| Figura 4-8 Planta de regasificación de El Musel [59] .....                                    | 66 |
| Figura 4-9 Planta de regasificación de Bilbao [59] .....                                      | 66 |
| Figura 4-10 Planta de regasificación de Sagunto [59].....                                     | 66 |
| Figura 4-11 Planta de regasificación de Mugaridos [60] .....                                  | 67 |
| Figura 4-12 KV Barentshav (Guardia Costera de Noruega) [63].....                              | 69 |
| Figura 4-13 Buque Turva (Guardia Fronteriza Finlandesa) [64] .....                            | 70 |
| Figura 4-14 Offshore Patrol Cutter (US Coast Guard) [65] .....                                | 70 |
| Figura 4-15 Años de servicio de los buques de la Armada (autoría propia) .....                | 71 |
| Figura 4-16 Línea temporal del desarrollo de combustibles (autoría propia) .....              | 72 |
| Figura 4-17 Mapa sinóptico del apartado (autoría propia).....                                 | 73 |
| Figura 4-18 Consumo de DFM-F76 en la Armada Española (autoría propia basado en [69]) .....    | 74 |
| Figura 4-19 Ibaizabal Quince [40] .....                                                       | 76 |
| Figura 4-20 Proyecto de los buques TLET de Navantia [70].....                                 | 76 |
| Figura 4-21 Buque hidrográfico Atair (Alemania) [71] .....                                    | 77 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3-1 Comparativa modelos turbina LM2500 (autoría propia basado en [31]) .....      | 31 |
| Tabla 3-2 Comparativa modelos turbina MT30 y MT7 (autoría propia basado en [33]).....   | 33 |
| Tabla 4-1 Bunkering por puertos en España en 2020 (autoría propia basado en [59]) ..... | 67 |



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción y motivación

Desde el comienzo de los tiempos la vida del hombre siempre ha estado ligada a la mar, y tal es su vínculo con esta, que gran parte de su evolución y desarrollo se puede estudiar de la mano junto con los medios existentes para la navegación de los que se disponían.

Siempre buscando la mejora continua, llegar más lejos y más rápido, con buques de mayor entidad y mejores características; la tecnología naval ha sido y es una ciencia objeto de estudio de los más sabios, pues las dificultades técnicas y las necesidades de los buques han ido evolucionando a lo largo de nuestra Historia, requiriendo en todo momento una rápida y eficaz adaptación a este medio.

A día de hoy nos encontramos inmersos en un mundo globalizado en el que el transporte marítimo, según la Organización Marítima Internacional, representa alrededor del 90% del comercio mundial y en el que tanto marinas mercantes como armadas de los distintos países persiguen un modelo económico y sostenible con el medioambiente que permita seguir desempeñando sus funciones de manera eficaz.

Es por ello que, dadas las exigencias medioambientales actuales establecidas por la Organización Marítima Internacional mediante el convenio MARPOL, referidas al consumo de combustibles fósiles y a las estrictas políticas de emisiones, la propulsión de los buques busca una solución que permita la adaptación al contexto actual y posibilite nuevas vías de desarrollo para un futuro próximo de la tecnología naval.

Surge así la idea de este trabajo de estudiar la propulsión a gas en buques dando un enfoque, como no podría ser de otra manera, a los buques militares, y poniendo en perspectiva a los buques que componen la Flota de Armada Española.

## 1.2 Objetivos

El objetivo de este estudio es analizar el estado del arte actual de la propulsión a gas en los buques militares, haciendo especial referencia a los sistemas de propulsión que emplean esta tecnología en los buques de la Armada Española; así como el estudio de la innovadora propulsión mediante el empleo de Gas Natural Licuado (GNL) y el análisis de una posible implantación de dicha tecnología en los buques actuales y futuros de la Armada.

Se establece como primer objetivo profundizar en el conocimiento sobre la propulsión basada en las turbinas de gas, una tecnología que a día de hoy está muy extendida en todas las marinas del mundo, no sólo como planta propulsora, sino también como generadora de energía eléctrica. Se busca

así estudiar y entender qué capacidades aporta dicha tecnología a nuestros buques y el porqué de su elección frente a otros sistemas de propulsión.

El segundo objetivo persigue el análisis de la propulsión basada en GNL, que surge con fuerza como alternativa factible a la propulsión de motores con fuel oil y diésel. Una tecnología innovadora que permite una considerable reducción de elementos contaminantes emitidos a la atmósfera y que se postula en los años venideros como la alternativa a desarrollar para lograr la eficiencia energética en el transporte marítimo.

De la mano de estos dos objetivos se busca además considerar la posible aplicación de dicha tecnología innovadora, no solo en los buques actuales de la Armada Española, mediante el correspondiente proceso de transformación, sino también en los futuros buques por construir, abriendo las puertas al establecimiento de nuevas líneas de investigación y desarrollo (I+D) tanto dentro del ámbito militar como del ámbito de ingeniería naval a nivel nacional.

### **1.3 Estructura del trabajo**

Con el fin de facilitar la comprensión del trabajo y obtener una visión organizada de los temas que en él se tratan, se ha estructurado el mismo de la siguiente manera:

- Introducción y objetivos: este apartado pretende sintetizar los motivos que han llevado a la realización de este trabajo, así como los objetivos que en él se pretenden alcanzar a lo largo del mismo. Al mismo tiempo, se explica la estructura que se ha aplicado en su desarrollo, con el fin de facilitar el entendimiento del mismo.
- Antecedentes: este capítulo introduce los tipos de propulsión naval que se pueden encontrar en los buques actuales, no sin antes hacer un breve recorrido en la historia de la propulsión naval, que permita situar el contexto actual en el que se desarrolla el trabajo.
- Estado del arte: este apartado explica en primer lugar dónde y cómo encontramos la propulsión a gas en los buques militares, es decir, las turbinas de gas. No siendo el gas el combustible motor, sino el fluido de trabajo, en este apartado se explica la evolución histórica de las mismas, así como los tipos de turbinas actuales y las ventajas e inconvenientes que proporcionan a los buques. Para entender el funcionamiento de las mismas, se detalla el funcionamiento de la turbina LM-2500 así como su empleo actual en la Armada Española. Tras esto, se introduce al GNL como combustible alternativo para los buques y se explica tanto el porqué de su aparición en el mundo naval como el desarrollo de la tecnología que lo acompaña.
- Aplicabilidad a la Armada: tal y como reza su título, esta sección del trabajo busca estudiar la viabilidad de instalar el GNL como combustible en los buques de la Armada Española. Para ello primero se abordará el proceso de transformación de un buque para adaptarse al GNL y se profundizará en el desarrollo de la industria de este combustible en nuestro país. Tras analizar el empleo del GNL en la Marinas de Guerra extranjeras, este apartado ofrece una visión de lo que se espera en el futuro próximo para la propulsión naval. Además, pone en valor el estado actual de la Flota de la Armada Española y plantea las posibilidades de la incorporación del GNL tanto en las unidades actuales como en las unidades futuras de la Flota.
- Conclusiones y líneas futuras: finalmente este capítulo pretende condensar y recopilar las ideas fuerza que se desprenden del trabajo. Asimismo, establece también las posibles vías de desarrollo futuro que puedan continuar con la línea de este trabajo.

A continuación, se muestra un mapa sinóptico que de manera simple y resumida abarca la totalidad del trabajo y aporta una visión global de los temas que en este se pretende abordar.

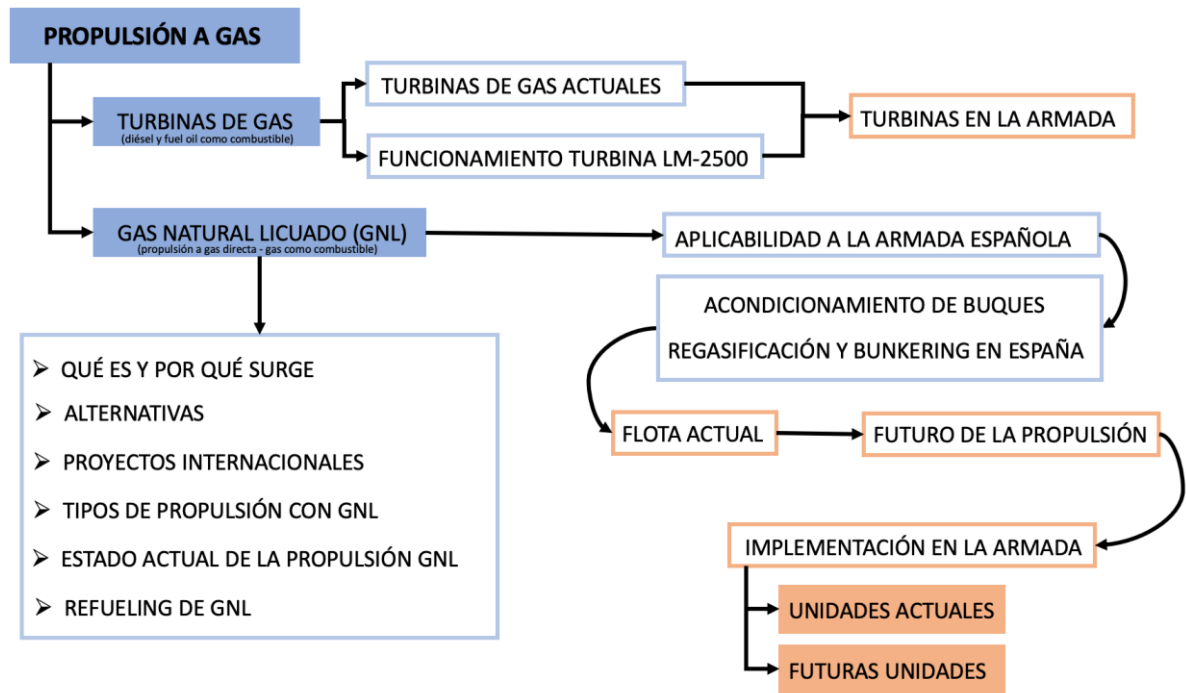


Figura 1-1 Mapa sinóptico del TFG (autoría propia)

## 1.4 Abreviaturas

|                 |                                                 |
|-----------------|-------------------------------------------------|
| BAM             | <i>Buque de Acción Marítima</i>                 |
| CO <sub>2</sub> | <i>Dióxido de Carbono</i>                       |
| CODAD           | <i>Combined Diesel And Diesel</i>               |
| CODAG           | <i>Combined Diesel And Gas</i>                  |
| CODELAG         | <i>Combined Diesel Electric And Gas</i>         |
| CODLOG          | <i>Combined Diesel Electric Or Gas</i>          |
| CODOE           | <i>Combined Diesel Or Electric</i>              |
| CODOG           | <i>Combined Diesel Or Gas</i>                   |
| COGAG           | <i>Combined Gas And Gas</i>                     |
| COGOG           | <i>Combined Gas Or Gas</i>                      |
| COSAG           | <i>Combined Steam And Gas</i>                   |
| DFM-F76         | <i>Diesel Fuel Marine NATO 76</i>               |
| ECA             | <i>Emission Control Areas</i>                   |
| F-100           | <i>Fragatas Clase "Álvaro de Bazán"</i>         |
| GE              | <i>General Electric</i>                         |
| GNL             | <i>Gas Natural Licuado</i>                      |
| JAL             | <i>Jefatura de Apoyo Logístico de la Armada</i> |
| JCI             | <i>LHD "Juan Carlos I"</i>                      |
| MCM             | <i>Medidas Contra Minas</i>                     |
| MGO             | <i>Marine Gas Oil</i>                           |

|                 |                                            |
|-----------------|--------------------------------------------|
| MTTS            | <i>Multiple Truck To Ship</i>              |
| NO <sub>x</sub> | <i>Óxido de Nitrógeno</i>                  |
| OMI             | <i>Organización Marítima Internacional</i> |
| PM              | <i>Material Particulado</i>                |
| PTS             | <i>Pipeline To Ship</i>                    |
| RCS             | <i>Removable Container To Ship</i>         |
| RTPN            | <i>Ramo Técnico de Plataformas Navales</i> |
| SO <sub>x</sub> | <i>Óxidos de Azufre</i>                    |
| STS             | <i>Ship To Ship</i>                        |
| TTS             | <i>Track To Ship</i>                       |
| UE              | <i>Unión Europea</i>                       |
| VLSFO           | <i>Very Low Sulfur Gasoil</i>              |

## 2 ANTECEDENTES

En este apartado se busca ofrecer una breve perspectiva de la evolución de la propulsión naval a lo largo de la Historia, para después incidir en los sistemas de propulsión que encontramos actualmente en los buques y de este modo poder contextualizar el desarrollo de este trabajo y lograr una mejor comprensión del mismo.

### 2.1 Perspectiva histórica

En un planeta en el cual el agua cubre alrededor del 70% de su superficie, no sería necesario esperar mucho tiempo hasta que el hombre comenzase sus primeras andaduras en la navegación de las mismas. Y así, subidos a troncos, los cuales darán paso a la creación de simples balsas, comenzaba la navegación por aguas tranquilas y costeras mediante el uso de remos. Fue en la Edad Antigua donde egipcios, fenicios, romanos y griegos desarrollaron la navegación a vela y combinaron el poder del viento con el del hombre a los remos. [1]

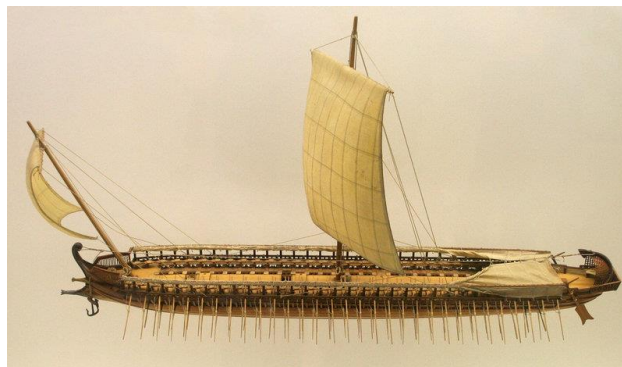


**Figura 2-1** Trirreme griego [2]

El desarrollo de las naves fue parejo al progreso en los conocimientos náuticos y astronómicos, que permitieron la realización de las primeras grandes navegaciones. De este modo, el hombre cada vez se desenvolvía con mayor soltura en un medio que en muchas ocasiones no era sino complejo y demandante. El afán por descubrir nuevos continentes, realizar navegaciones a lugares recónditos con exóticos productos, imponerse sobre las flotas enemigas en batalla y convertirse en los soberanos de la mar y del mundo, llevó a la tecnología naval a desarrollar buques de tales proporciones y características que pueden afirmarse hoy como piezas maestras de ingeniería.

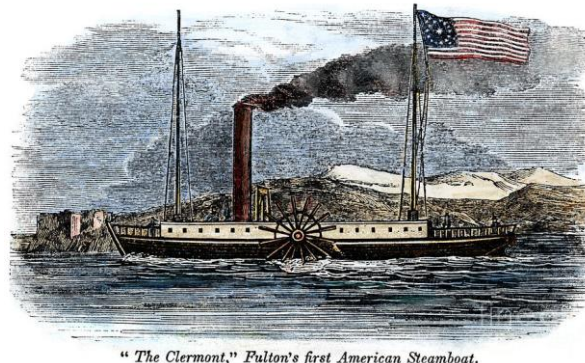
Y, porque no puede entenderse el progreso de la construcción de las naves sin la mejora y el perfeccionamiento de la ciencia de la navegación, esta simbiosis queda perfectamente ejemplificada a

través de los buques españoles y sus ilustres marinos, que a lo largo de la Historia colocaron España a la vanguardia de la tecnología naval, permitiendo llevar a cabo hazañas tales como el descubrimiento de América o la primera circunnavegación a la Tierra (hito el cual conmemora su quinto centenario en este año 2021).



**Figura 2-2 Nao Victoria 1515 [3] (izquierda) y Santísima Trinidad 1769 [4] (derecha)**

Sin embargo, la vela pasará a ser paulatinamente un modo de propulsión obsoleto con la llegada de la máquina de vapor de la mano del ingeniero e inventor inglés James Watt. Aun así, no será hasta 1807 cuando Robert Fulton diseñe el primer barco de vapor, el "Clermont", un barco que empleaba como propulsores ruedas de paletas laterales movidas por la novedosa máquina de vapor aplicada al entorno marino.



*"The Clermont," Fulton's first American Steamboat.*

**Figura 2-3 El Clermont 1807 [5]**

Comenzó de este modo el siglo XIX, en el cual las principales potencias marinas se embarcarían en una carrera por el desarrollo de esta tecnología, incluyendo grandes avances como la introducción de la hélice como elemento propulsor.

Ya a finales del siglo XIX y principios del XX, surgieron nuevas formas de propulsión, como el motor diésel, que pronto desbancarían a la máquina de vapor. Fue durante el desarrollo de este último siglo cuando surgieron las alternativas a la propulsión naval que conocemos hoy en día, entre las que se encuentran la propulsión nuclear, la turbina de gas y los motores eléctricos; así como la combinación de varios de ellos, con el objetivo dotar a los buques de mayor autonomía y maniobrabilidad y de alcanzar mayores rendimientos. Es ahora en pleno siglo XXI donde la comunidad científica busca desarrollar e implantar nuevas tecnologías más respetuosas con el medio ambiente, pero igual de eficientes que las hasta ahora conocidas. [6]

Por ello, considerando la rápida evolución que ha experimentado la propulsión naval en las últimas décadas, es complicado determinar qué podremos encontrar en los barcos de un futuro no tan lejano.

## 2.2 Sistemas de propulsión convencional actuales

Las plantas propulsoras que podemos encontrar a día de hoy instaladas en los buques, ya sean civiles o militares, son muy variadas pues los elementos que las componen y la disposición de los mismos a bordo los convierten en sistemas de propulsión únicos y característicos. Pese a ello, todo sistema de propulsión comparte un ADN básico, constituido por: fuerzas impulsoras (motores diésel o eléctricos, turbinas...), elementos de transmisión (ejes, trenes de engranajes, cajas reductoras...) y elementos terminales (hélices).

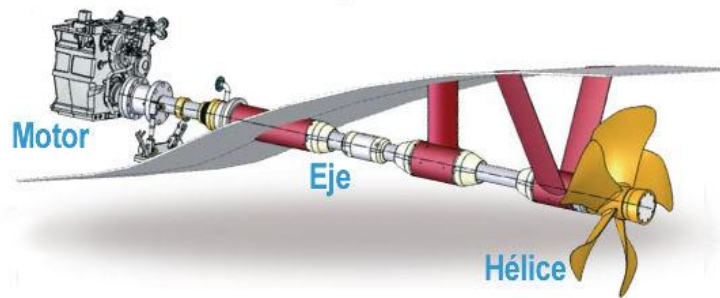


Figura 2-4 Esquema básico de una planta propulsora [7]

A continuación, se va a proceder a realizar un análisis de los sistemas de propulsión más comunes y extendidos en los barcos actuales. Para ello se presta atención a características tales como potencia entregada, volumen, relación peso/potencia, operatividad, etc.

### 2.2.1 Turbinas de vapor

Con su origen en 1894 de la mano de Charles Parsons, las turbinas de vapor son turbomáquinas que giran movidas por el flujo de vapor de agua a elevada temperatura. Siguiendo el ciclo termodinámico conocido como Ciclo Rankine, el agua calentada se transforma en vapor (alcanzando temperaturas entre 500 y 600 °C), que hace girar los álabes de la turbina. Para ello, los principales componentes de estas plantas propulsoras son: la caldera, donde se quema combustible para calentar el agua y producir el vapor; la turbina, donde se produce la expansión del vapor; el condensador, que recibe el vapor y lo devuelve a su estado líquido; y la bomba, que reconduce de nuevo el agua a la caldera.

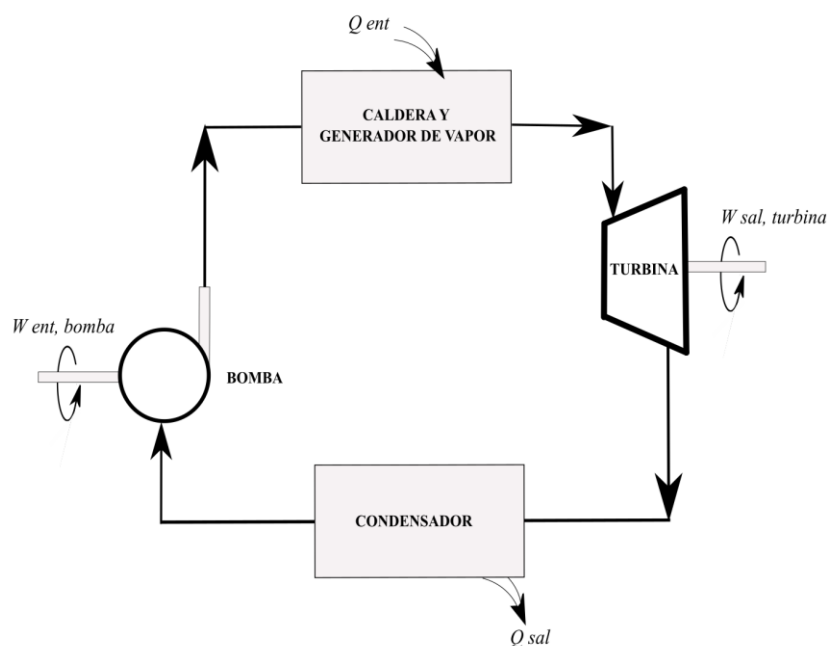


Figura 2-5 Esquema de funcionamiento de una Turbina de Vapor (autoría propia)

Las turbinas de vapor suelen estar dispuestas en línea de modo que, con configuraciones distintas para alta, media o baja presión, son capaces de convertir de un modo más eficiente la presión del vapor en movimiento rotativo de los álabes. [8]

Ejemplo de este tipo de propulsión lo encontramos en el BAP Almirante Grau, un crucero ligero lanzamisiles de la Marina de Guerra del Perú, cuya planta propulsora contaba con 2 turbinas De Schelde Parsons. [9]



**Figura 2-6 BAP Almirante Grau [9]**

Este tipo de propulsión se caracteriza por proporcionar grandes potencias (alrededor de 85000 CV), pero requieren de instalaciones voluminosas y pesadas, por lo que la relación peso/potencia es baja. Además, la complejidad mecánica es elevada dado el número de elementos auxiliares que intervienen; y la puesta en marcha o puesta fuera de servicio abarca periodos de varias horas, lo que induce altos costos de operación y limitaciones en la operatividad del buque.

### *2.2.2 Motores diésel*

Los motores diésel marinos de combustión interna son la planta de propulsión más extendida en los buques de la actualidad. Desde sus inicios con la idea experimental de Rudolf Diesel en 1892, estos motores han ido evolucionando tanto para los motores de automóviles como para los motores marinos. Entre estos últimos encontramos motores de 2 y 4 tiempos, los cuales son idóneos para buques de baja y de alta o media velocidad respectivamente. [10]

Empleados mayoritariamente en buques de grandes proporciones y tonelaje como los petroleros, los portacontenedores o los buques de guerra auxiliares, los motores de baja velocidad quedan acoplados directamente al eje por lo que no necesitan de engranajes reductores; y son capaces de entregar potencias de hasta 50.000 CV.



**Figura 2-7 Motor diésel marino 2-t Wartsila RT-Flex [10]**

Por otro lado, los motores de media o alta velocidad precisan de reductoras para acoplarse al eje, y el rango de potencias entregadas abarca desde los 100 CV hasta los 10.000 CV. Estos se pueden

encontrar en buques de recreo, así como en cruceros de pasajeros, mercantes de medianas proporciones y buques de guerra. [11] De entre los miles de barcos que cuentan con este tipo de propulsión, un ejemplo de ello es el BAC Cantabria (A15) de la Armada Española, cuya planta propulsora cuenta con dos motores diésel de 14.800 CV. [12]



Figura 2-8 BAC Cantabria (Armada Española) [12]

Este tipo de propulsión se caracteriza por tener mejor relación peso/potencia que las turbinas de vapor, el combustible y su distribución están muy extendidos; y son más eficientes a cargas parciales y a velocidades de crucero que las turbinas de gas. Por contra, los mantenimientos necesarios en la planta son muy frecuentes dada la cantidad de elementos móviles que intervienen.

No obstante, encontraremos a los motores diésel en muy numerosas ocasiones formando parte de plantas de propulsión combinadas, de las que se realizará un análisis en mayor profundidad más adelante.

### 2.2.3 Turbinas de gas

Las turbinas de gas en la propulsión naval tal y como las conocemos hoy en día provienen de la patente que en 1930 Frank Whittle desarrolló para el motor de una aeronave. Los principales componentes de las turbinas de gas marinas son el compresor, la cámara de combustión, la sección de turbinas y la sección de accesorios para la transmisión, que funcionan siguiendo el ciclo termodinámico conocido como Ciclo Brayton.

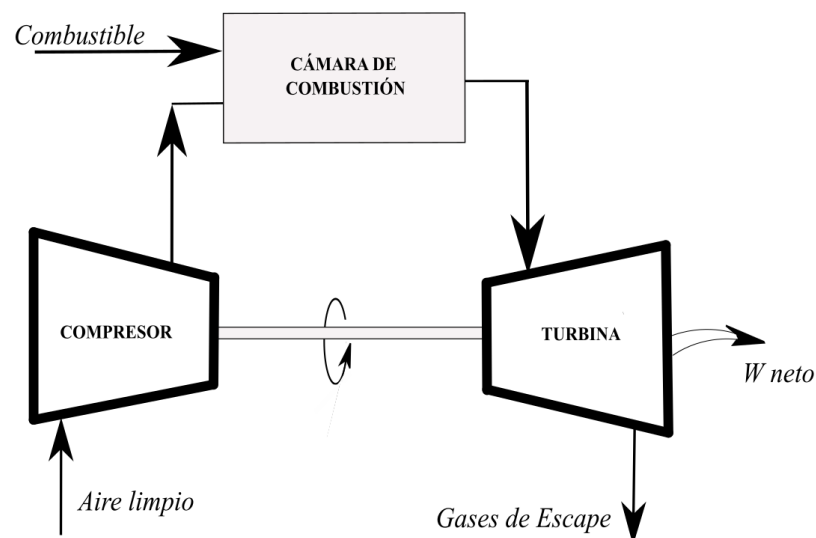


Figura 2-9 Esquema del Ciclo Brayton en una Turbina de Gas (autoría propia)

Siguiendo tal ciclo, el aire atmosférico entra al compresor (movido por la turbina), donde tras comprimirlo y elevar su temperatura, el aire es descargado a la cámara de combustión en la cual se inyecta el combustible. Los gases de la combustión salen a gran velocidad y se dirigen a la turbina, donde se produce la expansión de los mismos, provocando el movimiento de la turbina. [13]

Las plantas de propulsión basadas en turbinas de gas se caracterizan por entregar potencias de hasta 50.000 CV y presentar una mejor relación peso/potencia que otros sistemas; además de permitir alcanzar mayores velocidades en menores periodos de tiempo. Sin embargo, estas plantas propulsoras presentan un bajo rendimiento energético y consumo de combustible que es muy superior al que poseen sistemas como los motores diésel.

Es por ello que es más frecuente encontrar este tipo de propulsión en buques militares que en buques civiles, ya que los primeros se desempeñan en entornos donde requieren altas capacidades de potencia y reacción. Ejemplo de estos es el BNS Greenhalgh de la Marina de Guerra de Brasil, que cuenta con 2 turbinas de gas Rolls-Royce Olympus TM3B para alta velocidad y 2 turbinas de gas Rolls Royce Tyne RM1C para velocidad de crucero. [14]



**Figura 2-10 BNS Greenhalgh (Marinha do Brasil) [15]**

Sin embargo, del mismo modo que sucede con los motores diésel, dadas sus características, es más frecuente encontrar a las turbinas de gas en plantas propulsoras combinadas, donde pueda aportar mayores beneficios que como sistema independiente y único de propulsión.

### *2.2.4 Motores eléctricos*

Los sistemas de propulsión eléctrica son aquellos que permiten a los buques navegar haciendo uso de motores eléctricos que reciben la energía eléctrica procedente de generadores. Se trata de una tecnología con más de cien años de antigüedad pero que no ha recibido un gran impulso hasta finales del siglo XX, y cuya estructura básica puede desglosarse en las siguientes etapas: generación (motores diésel, turbinas, generadores...), distribución (baterías, transformadores, convertidores...) y propulsión (motor eléctrico). [16]

Las plantas propulsoras eléctricas se caracterizan por emitir menores ruidos y vibraciones, así como emisiones contaminantes, lo cuales las convierte en idóneas para cumplir con los requisitos medioambientales actuales. Además, permiten una mayor maniobrabilidad e incrementan el ciclo de vida de la propia planta, pues emplean motores diésel ligeros de baja vulnerabilidad. Por otra parte, son sistemas compactos y eficaces y permiten una disposición libre a bordo de los distintos elementos, ofreciendo potencias de hasta 35.000 CV. [17]

Sin embargo, estos sistemas implican mayores gastos de inversión inicial y una cadena de mantenimientos completamente diferente a las tradicionales y más extendidas de los motores diésel y turbinas de gas.

Debido a las múltiples ventajas que ofrece, podemos encontrar actualmente este tipo de planta propulsora instalada en buques como ferris, cruceros, remolcadores, rompehielos y buques militares

también. Ejemplo ello es el USS Zumwalt (DDG-1000) de la Marina de Guerra de los Estados Unidos, que incorpora dos hélices propulsadas por motores eléctricos, movidos por 2 turbinas de gas Rolls-Royce Marine Trent-30 conectadas a generadores eléctricos Curtiss-Wright45 y 2 generadores de turbina Rolls-Royce RR45004.



Figura 2-11 USS Zumwalt (United States Navy) [18]

### 2.2.5 Plantas propulsoras combinadas

Son las plantas propulsoras combinadas las que, principalmente instaladas en buques militares, ofrecen una alternativa más eficiente a la propulsión naval, dado que permiten aprovechar las ventajas de los distintos sistemas que en ellos se implantan.

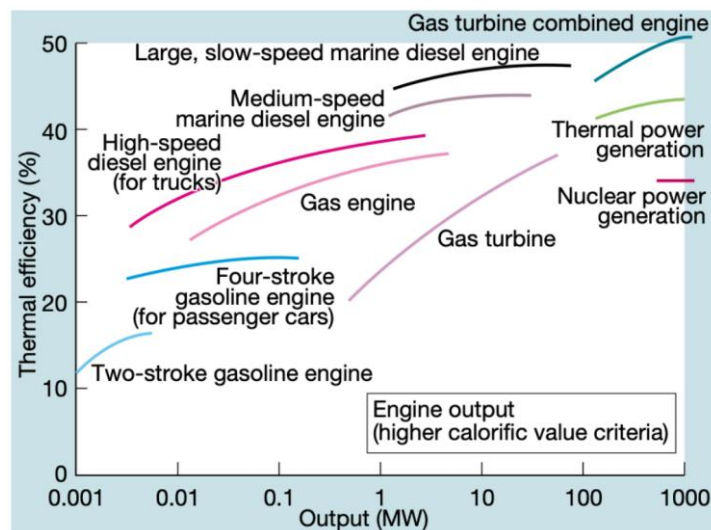


Figura 2-12 Eficiencia térmica de motores diésel y a gas [19]

En vista de los valores de eficiencia térmica de los distintos tipos propulsión que se observan en la Figura 2-12, las diferentes propuestas de propulsión combinada buscan de algún modo ser capaces de conjugar dos sistemas propulsores indistinta o conjuntamente sobre un mismo árbol de hélice, para ofrecer una alternativa más eficiente, y en la mayoría de los casos, más económica.

Por ello, a continuación, se muestran los tipos de plantas combinadas más extendidas implantadas en los buques actuales. [16]

#### 2.2.5.1 CODOG (Combined Diesel Or Gas)

Se caracteriza por incorporar sobre cada árbol de hélice un motor diésel, normalmente empleado para adoptar velocidades de crucero, y una turbina de gas que se emplea cuando se desea alcanzar velocidades máximas. El sistema de transmisión y embragues únicamente permite que se haga uso de uno de ellos al mismo tiempo.

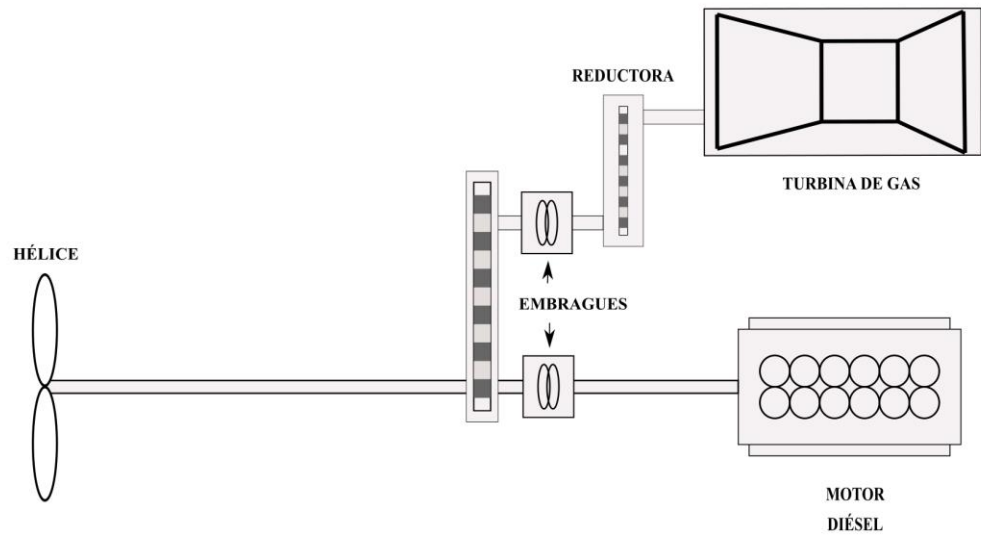


Figura 2-13 Esquema planta CODOG (autoría propia)

### 2.2.5.2 CODAG (Combined Diesel And Gas)

Con la misma filosofía que el sistema CODOG, este permite que, mediante el empleo de un sistema de embragues más complejo y cajas de transmisión multivelocidad, se puedan acoplar sobre el árbol de hélice conjunta o indistintamente tanto los motores diésel como la turbina de gas.

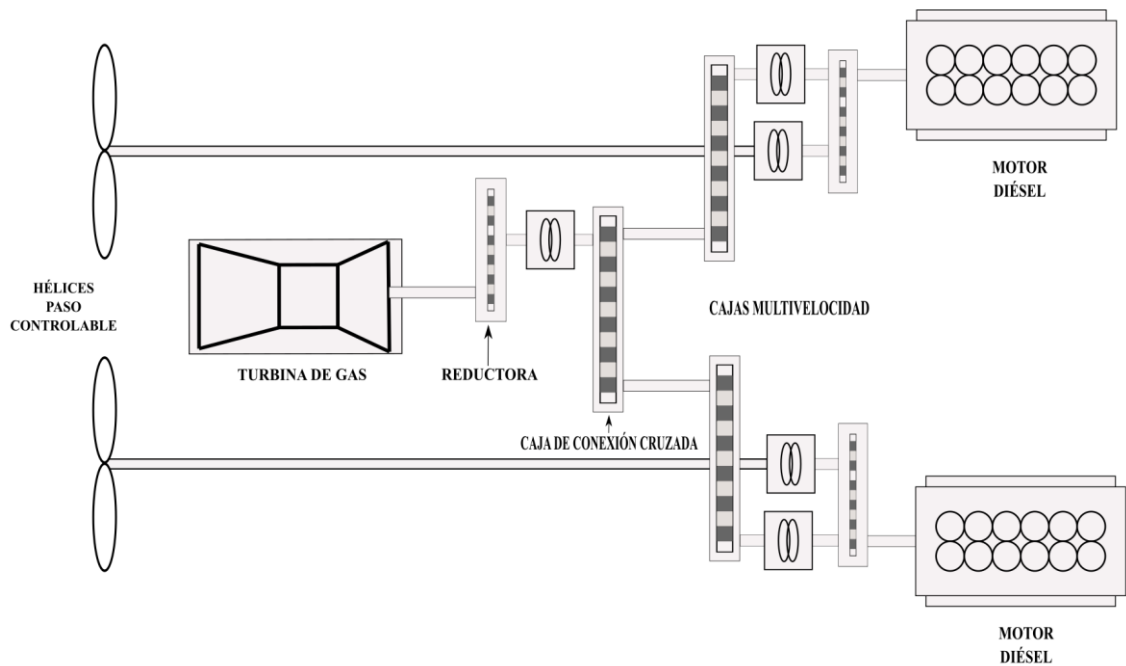


Figura 2-14 Esquema planta CODAG (autoría propia)

### 2.2.5.3 CODAD (Combined Diesel And Diesel)

Este sistema tradicional permite el acople simultáneo o por separado de dos motores diésel sobre el mismo árbol de hélice.

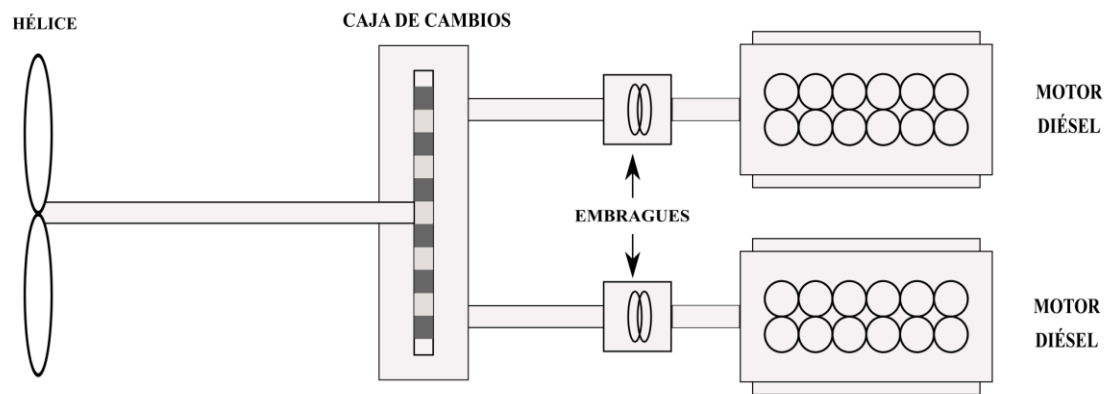


Figura 2-15 Esquema planta CODAD (autoría propia)

#### 2.2.5.4 COGAG (Combined Gas And Gas)

Este sistema presenta dos turbinas de gas de similares características que, gracias a un sistema de embragues y cajas reductoras, permite que se puedan acoplar al mismo tiempo o de manera independiente las dos turbinas de gas sobre el mismo árbol de hélice.

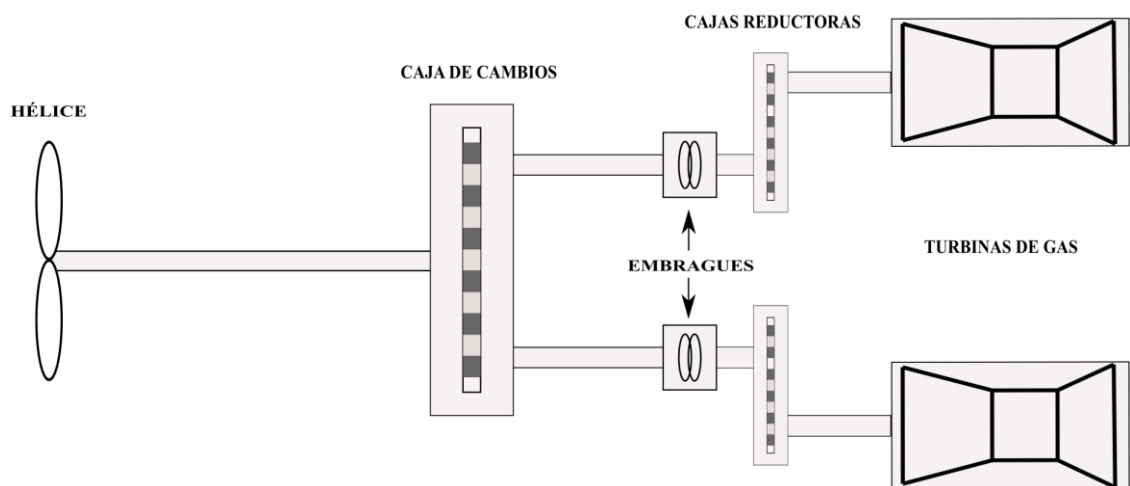


Figura 2-16 Esquema planta COGAG (autoría propia)

#### 2.2.5.5 COGOG (Combined Gas Or Gas)

Se caracteriza por emplear dos turbinas de gas al igual que el COGAG, pero en este caso, una de ellas es de menor entidad y es empleada para alcanzar velocidades de crucero; y la otra de mayor potencia, es empleada para adoptar velocidades máximas. Al emplear un mecanismo de embrague y cajas reductoras más sencillo, tan solo una de las turbinas puede acoplada al árbol de hélice al mismo tiempo.

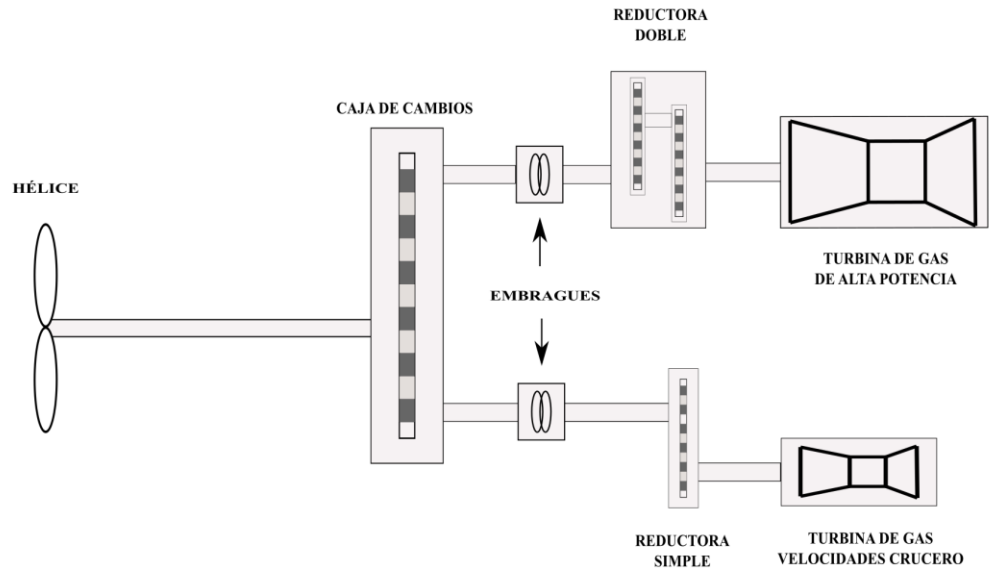


Figura 2-17 Esquema planta COGOG (autoría propia)

#### 2.2.5.6 COSAG (Combined Steam And Gas)

Buscando reunir las ventajas de las turbinas de gas y de vapor, este sistema permite que una turbina de gas y una turbina de vapor se acoplen al mismo árbol de hélice, indistinta o conjuntamente, mediante un sistema de embragues y cajas reductoras de cierta complejidad.

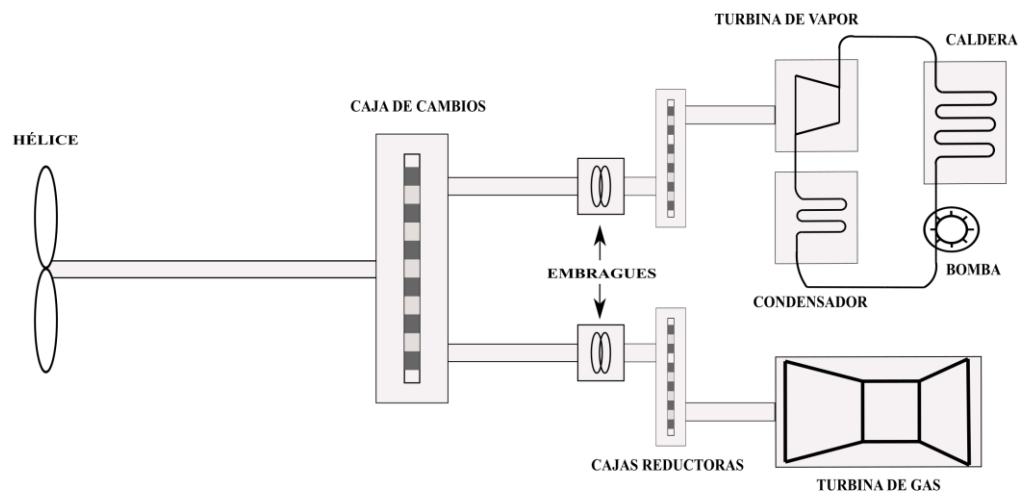


Figura 2-18 Esquema planta COSAG (autoría propia)

#### 2.2.5.7 CODELAG (Combined Diesel-Electric And Gas)

Esta innovadora propuesta, aunque no muy extendida, consigue combinar la propulsión de la turbina de gas, destinada a lograr velocidades altas; con motores eléctricos que son alimentados por generadores diésel, para alcanzar velocidades de crucero. El sistema de embragues y cajas reductoras permite que ambos sistemas puedan emplearse al mismo tiempo o por separado sobre el mismo árbol de hélice.

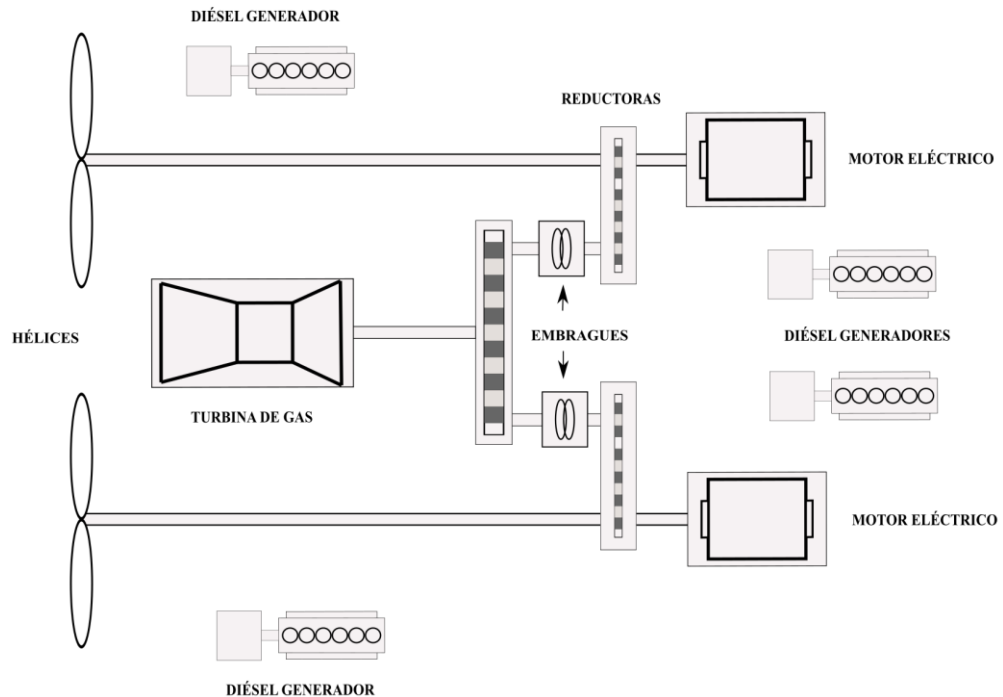


Figura 2-19 Esquema planta CODELAG (autoría propia)

#### 2.2.5.8 CODLOG (Combined Diesel-Electric Or Gas)

Con el mismo esquema y la misma teoría que el sistema CODELAG, éste sin embargo no permite el empleo simultáneo de turbina de gas y motores eléctricos.

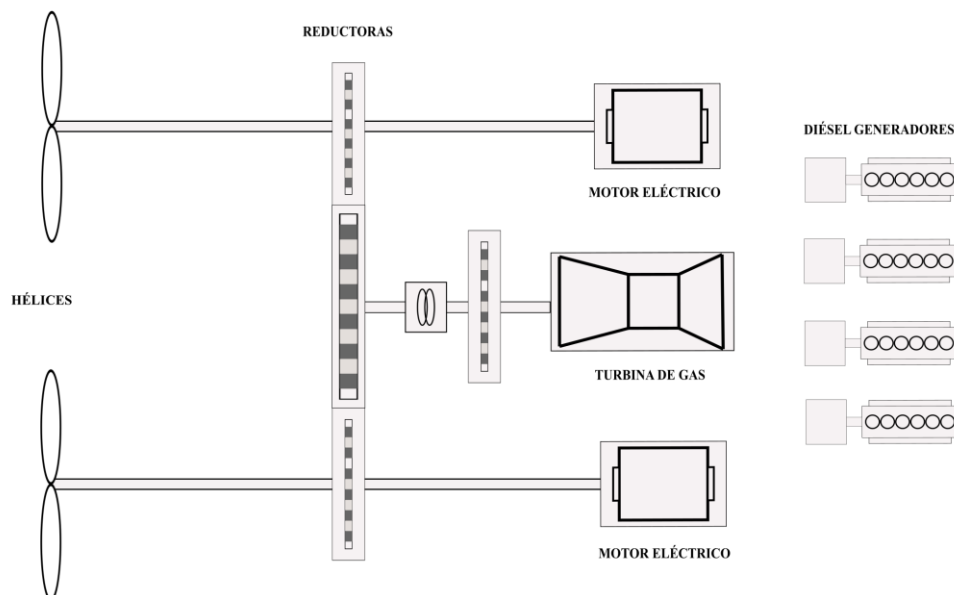


Figura 2-20 Esquema planta CODLOG (autoría propia)

#### 2.2.5.9 CODOE (Combined Diesel Or Electric)

Este tipo de planta propulsora combina sobre el mismo árbol de hélice motores diésel y motores eléctricos alimentados por generadores diésel, no siendo posible el empleo simultáneo de ambos al mismo tiempo.

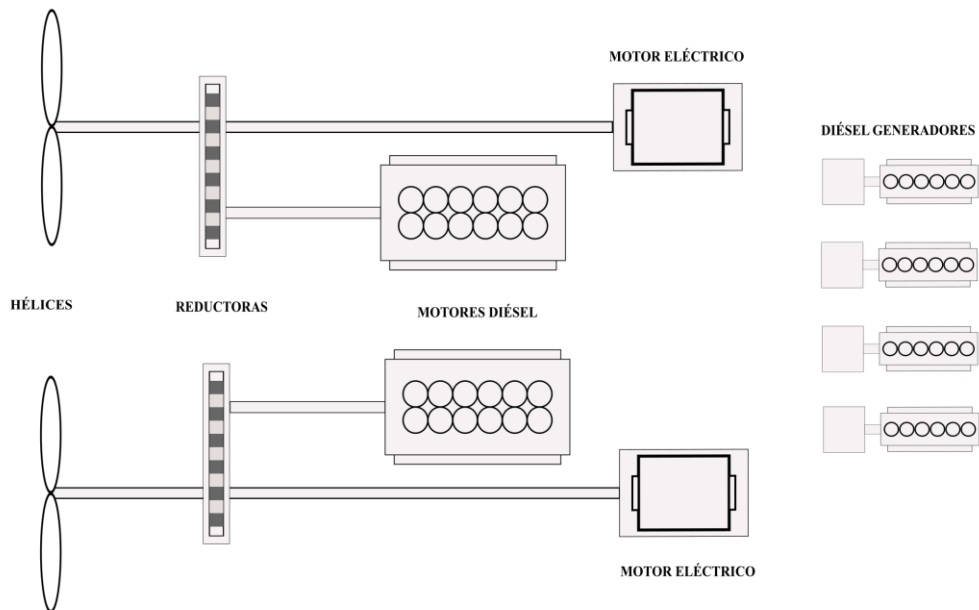


**Figura 2-21 Esquema planta CODOE (autoría propia)**

Las distintas opciones se ven empleadas en buques militares de toda clase, desde patrulleros y corbetas, hasta buques de mayor entidad como destructores, fragatas o portaviones. La proporción de la instalación de estas plantas combinadas sigue la siguiente distribución a nivel mundial (Figura 2-22), pudiendo apreciar cómo la combinación entre motores diésel o turbinas de gas es la más extendida, con diferencia sobre el resto.

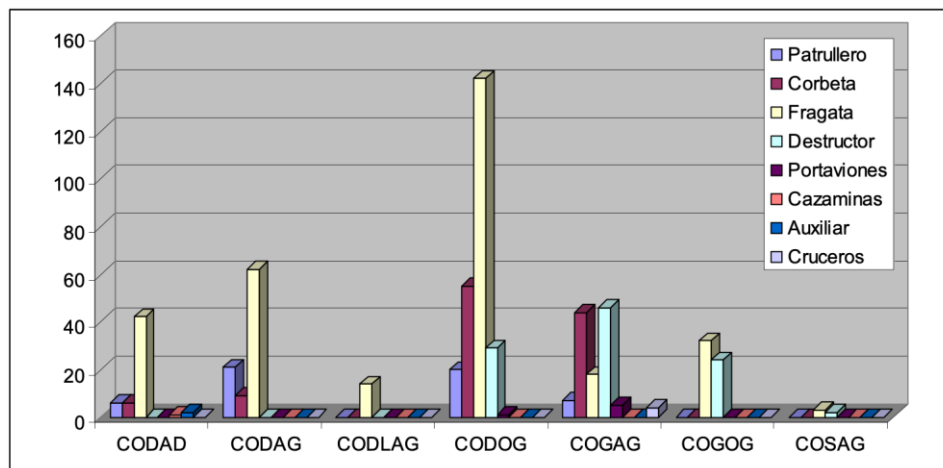


**Figura 2-22 Reparto de plantas propulsoras por tipos de buques a nivel mundial [20]**

### 2.2.6 Sistemas alternativos

De manera paralela a los sistemas convencionales, se han desarrollado otros sistemas de propulsión que han supuesto una alternativa real y eficiente a los ya existentes. Entre ellos cabe destacar los siguientes, por ser innovadores dentro del mundo de la propulsión naval.

#### 2.2.6.1 Propulsión Magnetohidrodinámica

Este sistema de propulsión se basa en el empleo de los campos magnéticos y eléctricos para producir el movimiento de la embarcación. Esto se consigue dotando al agua de carga eléctrica y después acelerarlo mediante campos magnéticos, consiguiendo un empuje en la dirección opuesta.

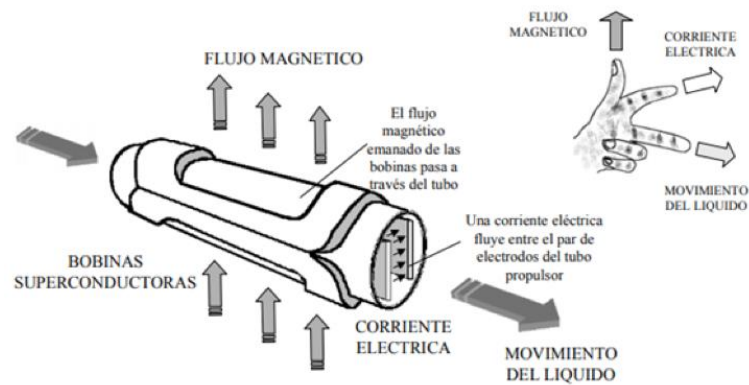


Figura 2-23 Principio Magnetohidrodinámico [21]

Ejemplo de ello es el Yamato -1, primer buque construido con este tipo de propulsión, que, a pesar de ser innovadora, pues no tiene partes móviles, el desarrollo actual de la tecnología, lo convierte en un sistema caro y con peores prestaciones que los convencionales.



Figura 2-24 Yamato – 1 [22]

### 2.2.6.2 Propulsión mediante Rotores Flettner

Este tipo de planta propulsora surge como evolución al tradicional uso de las velas en las naves, pues aplicando la teoría del Efecto Magnus, según el cual "la rotación de un objeto afecta a la trayectoria del mismo a través de un fluido, como, por ejemplo, el aire", se aprovecha la energía de gases en movimiento para propulsar los barcos.

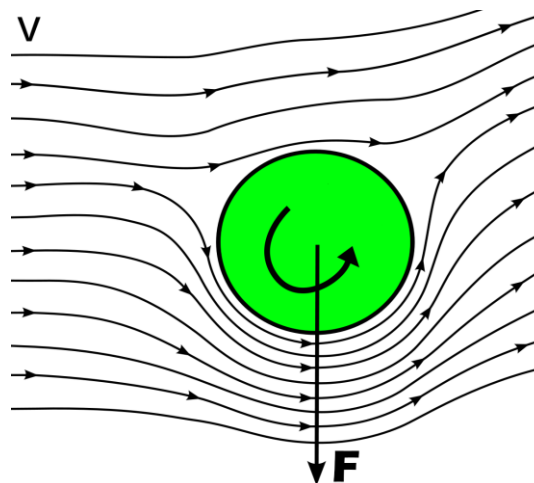


Figura 2-25 Efecto Magnus [23]

Uno de los barcos actuales donde este tipo de propulsión está implantado es el E-Ship 1 de Enercon, en el cual se aprovecha el empleo de 4 rotores Flettner (movidos por los gases de exhaustación de los motores diésel del propio barco) para lograr un ahorro de hasta el 40% en combustible.



**Figura 2-26 E-Ship 1 con rotores Flettner [24]**

### 2.2.6.3 Propulsión a chorro o "Hidrojet"

Este modo alternativo de propulsión se basa en el principio de acción y reacción, pues consigue el empuje en una dirección mediante la expulsión hacia la dirección opuesta de una corriente de líquido a gran velocidad. Compuesto por una bomba centrífuga en el interior de un conducto con una tobera en el extremo del mismo, este sistema no requiere de timones en la embarcación, ya que se consigue cambiar de rumbo variando la orientación del chorro a la salida de la tobera mediante deflectores.

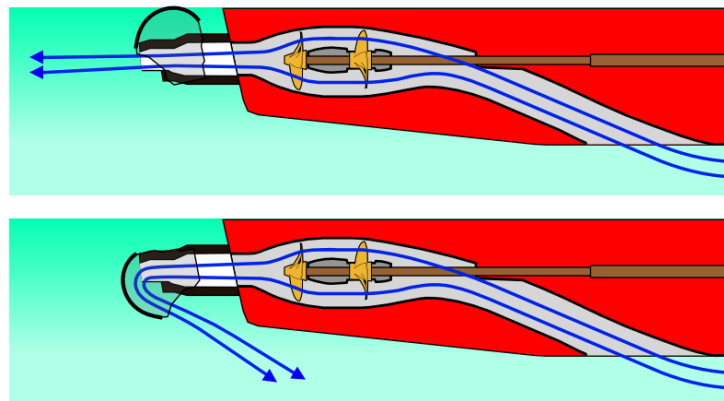


**Figura 2-27 Principio de funcionamiento del "Hidrojet" [16]**

Dada la buena maniobrabilidad que proporciona y así como las grandes velocidades que permite alcanzar, este tipo de propulsión se puede encontrar desde pequeñas embarcaciones de recreo hasta buques militares, como las corbetas de la clase "Visby" de la Marina de Guerra de Suecia.



**Figura 2-28 Corbeta clase Visby de la Marina Real Sueca [25]**

#### 2.2.6.4 Propulsión Voith-Schneider

Este sistema de propulsión se fundamenta en el giro individual sobre su eje vertical de una serie de álabes hidrodinámicos contenidos en una rueda de paletas articulada. Al cambiar de orientación sobre su propio eje vertical, se puede conseguir empuje en cualquier dirección sin la necesidad de existencia de timones en la embarcación.

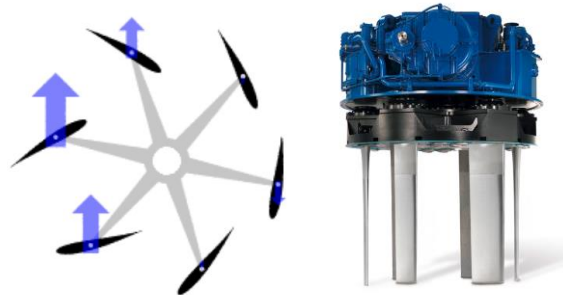


**Figura 2-29 Principio de funcionamiento y motor Voith-Schneider [16]**

Ejemplo de buques con este tipo de propulsión son los Cazaminas de la clase Segura de la Armada Española, que incorporan dos propulsores en cada unidad.



**Figura 2-30 Cazaminas Turia de la Armada Española [12]**



## 3 ESTADO DEL ARTE

Este apartado queda dividido en las dos formas de propulsión a gas en los buques que se van a estudiar con profundidad en este trabajo. Por un lado, se explica la tecnología de la turbina de gas en la propulsión naval, incidiendo en la presencia de esta en la Armada Española; y, por otra parte, se introduce el Gas Natural Licuado como combustible naval, así como el desarrollo de la tecnología que lo acompaña.

### 3.1 La turbina de gas en la propulsión naval

La denominación como turbinas de gas puede llevar a confusión y derivar en el pensamiento de que emplean un combustible gaseoso. Sin embargo, se las conoce como turbinas de gas puesto que emplean como fluido de trabajo un gas, en este caso, el aire comprimido; pudiendo tener como combustibles el diésel, gasóleos o fuel oil de bajo contenido en azufre.

#### 3.1.1 Evolución

Pese a que no sería hasta 1930 cuando se tome la patente de Sir Frank Whittle como la primera turbina como medio propulsor, ya desde el siglo II A.C, el filósofo Herón de Alejandría desarrolló una idea que puede considerarse como el origen de la tecnología que conocemos hoy en día.

Conocida como Eolipila, este invento es considerado como la primera máquina térmica de la Historia. En esta se formaba vapor de agua que, siguiendo el principio de acción reacción, conseguía hacer rotar un mecanismo a través de tubos de vapor.



Figura 3-1 Eolipila de Herón [26]

Desarrollando de manera similar este principio, el estudio de la expansión de los gases llevó a famosos científicos a idear nuevas máquinas, como la cocina de Leonardo Da Vinci, la turbina a chorro de Giovanni Branca o el vagón de vapor de Sir Isaac Newton, en las que un chorro de vapor provocaba el movimiento de las máquinas.

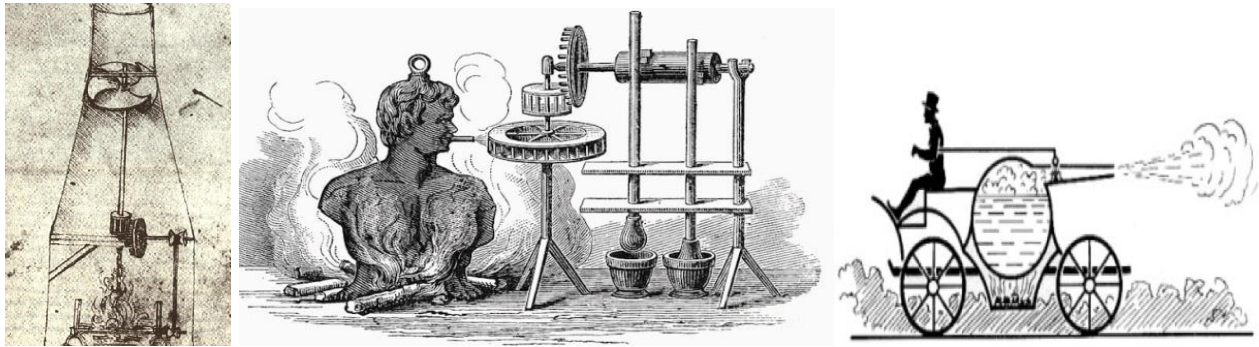


**Figura 3-2 Bocetos de la cocina de Da Vinci (izquierda) [27], la turbina a chorro de Branca (centro) [28] y el vagón de vapor de Newton (derecha) [29]**

Siguiendo con el estudio de esta tendencia tecnológica, el siguiente hito, que sirvió de inspiración a la patente de Sir Frank Whittle, fue la turbina de gas del británico John Barber, que, a pesar de consolidar los conceptos de las turbinas de gas, no fue capaz de materializar su proyecto.

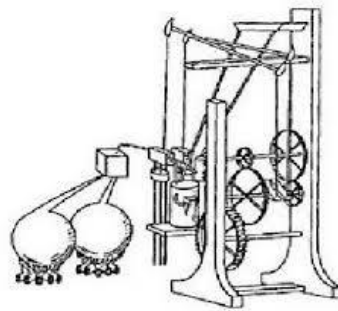


**Figura 3-3 Turbina de gas de John Barber [30]**

Tras la publicación de la patente de Whittle, no pasaron muchos hasta que se consiguió aplicar esta tecnología al mundo de la aviación, cuando en 1941, la empresa General Electric desarrolló la primera aeronave propulsada a reacción, que contaba con un compresor de flujo axial y una cámara de combustión anular (diseño muy similar al de hoy en día).

Finalmente, estas derivarían en el empleo de las turbinas en la propulsión naval, bajo la denominación de turbinas aeroderivadas, las cuales a mediados de siglo XX estaban ya ampliamente difundidas entre las marinas de todo el mundo; eso sí, de manera conjunta con otros sistemas de propulsión convencionales, formando las anteriormente mencionadas plantas propulsoras combinadas.

### ***3.1.2 Tipos de turbinas empleadas actualmente***

En la actualidad las turbinas de gas se emplean tanto en buques militares como civiles, siendo más comunes en los primeros, ya que aportan muy favorables capacidades de reacción y velocidad, pero a una tasa de consumo y coste de combustible elevada, que hace que las empresas civiles opten por otras tecnologías más viables y llamativas económicamente.

Es por ello que existe una gran variedad de modelos distintos de turbinas de gas, adaptados a las necesidades de cada buque y con las características propias de cada fabricante de las mismas. Y no solo se emplean para propulsión de buques, sino también para generación de energía eléctrica.

Dos de las empresas mundiales más fuertes en este sector son General Electric Company y Rolls Royce PLC, por lo que a continuación se expondrán algunos de los ejemplos de turbinas de gas más comunes tanto en el mundo civil como el militar.

Entre estos cabe destacar las turbinas LM2500 por parte de la firma General Electric y las turbinas MT30 y la combinación de las turbinas Spey & Olympus de la empresa Rolls Royce.

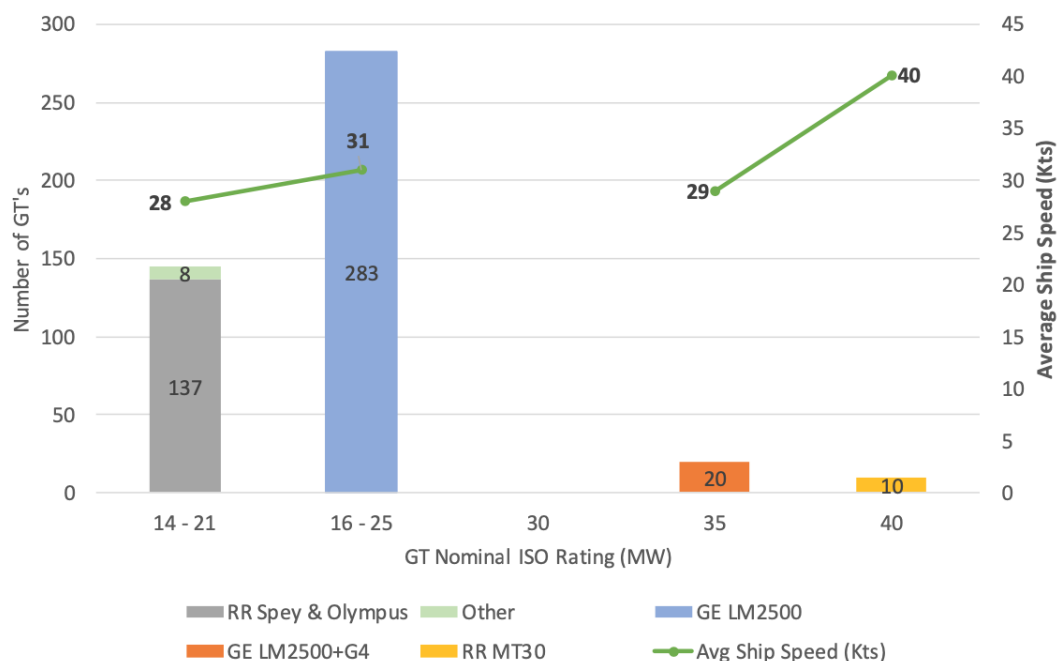


**Figura 3-4 Gráfica de modelos de turbinas de gas, potencia y velocidad media [31]**

Tal y como podemos observar en la gráfica, que muestra el número total de turbinas de gas instaladas en buques militares con respecto a la potencia entregada, además de la velocidad media y el tipo de turbina por colores; el 61.8% de las mismas son del modelo LM2500, y el total de las turbinas que no superan los 25 MW de potencia entregada asciende al 93,4%. De aquí se puede apreciar que los modelos de la empresa británica están claramente menos extendidos, siendo la opción de la empresa norteamericana la solución a las plantas propulsoras más común entre las marinas mundiales.

Dentro de la familia de las turbinas LM2500 de GE existen 3 modelos: LM2500, LM2500+ y LM2500+G4, siendo los dos últimos mejoras del primero.

|                                                   | LM2500 | LM2500+ | LM2500+G4 |
|---------------------------------------------------|--------|---------|-----------|
| <b>Peso (kg)</b>                                  | 4672   | 5237    | 5237      |
| <b>Potencia (MW)</b>                              | 25,06  | 30,20   | 36,98     |
| <b>Consumo específico de combustible (g/KW-h)</b> | 226,9  | 215,3   | 214,1     |
| <b>Velocidad de turbina de potencia (rpm)</b>     | 3600   | 3600    | 3600      |

**Tabla 3-1 Comparativa modelos turbina LM2500 (autoría propia basado en [31])**

Con dimensiones del módulo muy similares, los nuevos modelos proporcionan una mayor potencia con una disminución del consumo específico de combustible, que responde al incremento de la eficiencia térmica, alcanzado esta valores próximos al 40%. Entre otros factores, esta mejora se debe a la introducción de una etapa más en el compresor, que permite un aumento del 20% del flujo de aire y eleva hasta valores de 23:1 la relación de compresión en el mismo.

Haciendo referencia a los buques militares, encontramos que GE ha proporcionado estos modelos de turbinas para más de 30 marinas de guerra alrededor de todo el mundo, entre los cuales se encuentra la Armada Española; estableciendo depósitos de servicios mundiales y acuerdos de servicios personalizados en 8 enclaves estratégicos, de entre los cuales cabe destacar la fructuosa relación con Navantia en España.

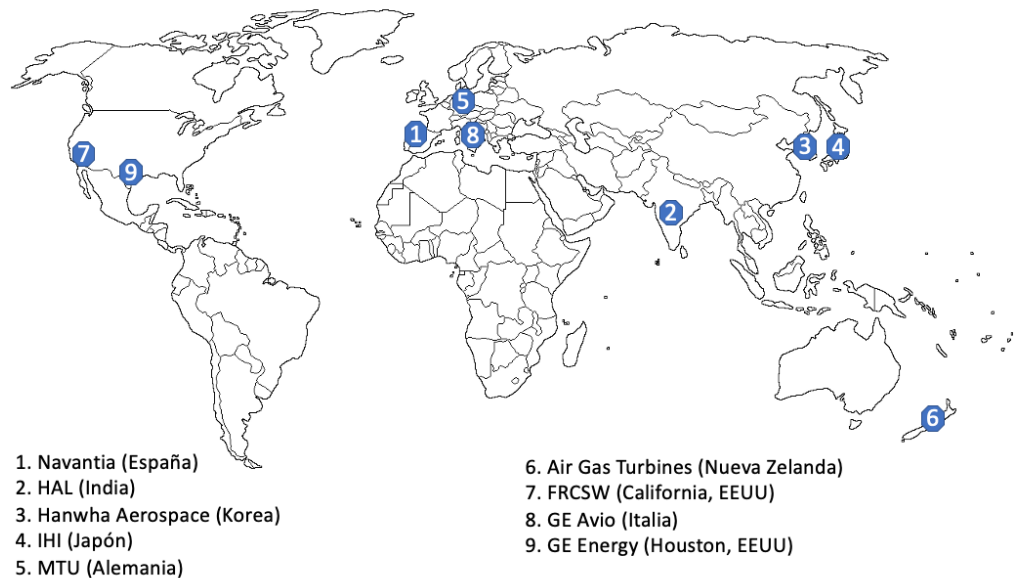


**Figura 3-5 Depósitos de servicios mundiales de General Electric (autoría propia basado en [31])**

Dentro del mundo de la marina civil el modelo LM2500 también está muy extendido en ferris y cruceros, en muchos no como unidad de propulsión sino como generador de electricidad. En estos casos, las turbinas comerciales reciben como nombre la potencia entregada, por ejemplo, las turbinas de 30,2 MW (similares a las LM2500+), como las dos que incorpora el Queen Mary 2, un crucero con bandera de Bermudas.



**Figura 3-6 Crucero Queen Mary 2 [32]**

Por otra parte, dentro de las turbinas de la firma Rolls Royce, cabe destacar la MT30 y la MT7, también de aplicación a buques militares, aunque claramente diferenciados.

|                                                   | MT30 | MT7   |
|---------------------------------------------------|------|-------|
| <b>Peso (kg)</b>                                  | 6200 | 459   |
| <b>Potencia (MW)</b>                              | 36   | 4,6   |
| <b>Consumo específico de combustible (g/KW-h)</b> | 215  | 260   |
| <b>Velocidad de turbina de potencia (rpm)</b>     | 3600 | 15000 |

**Tabla 3-2 Comparativa modelos turbina MT30 y MT7 (autoría propia basado en [33])**

Con características similares a la turbina LM2500+G4, la turbina MT30 presenta también una elevada eficiencia térmica (hasta el 40%) y una buena relación peso-potencia, lo cual la convierte en idónea para formar parte de las plantas propulsoras de buques como los de la clase Freedom de la Marina de Guerra de los Estados Unidos o las futuras fragatas Tipo 26 de la Marina de Guerra del Reino Unido.

Por el contrario, las turbinas MT7 constituyen una versión ligera y compacta de turbina de gas, que las convierte en apropiadas para buques de necesidades especiales como son los Hovercraft o los buques de desembarco de aproximación a tierra para Operaciones Anfibias.



**Figura 3-7 Ship-to-Shore Connector Hovercraft (US Navy) [18]**

Los Hovercraft de desembarco anfibio de la US Navy cuentan con cuatro turbinas MT7 para la propulsión de los mismos, permitiendo alcanzar velocidades de alrededor de 35 nudos, lo cual los convierte en muy versátiles para llevar a cabo operaciones anfibias que requieren velocidad y precisión.

### 3.1.3 LM-2500

Las turbinas LM2500 son turbinas de gas (2.2.3) derivadas del turbofan CF6-6 empleado en motores de aviación. Es necesario incidir en que, aunque se conozcan como turbinas de gas, estas emplean como combustible el DFM-F76 (Diesel Fuel Marine NATO 76), al igual que los motores diésel de combustión interna.

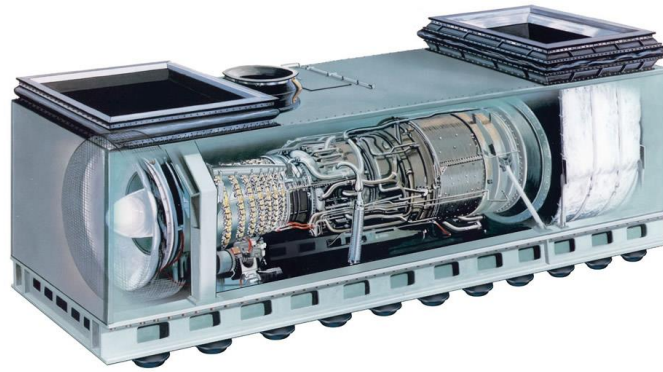


Figura 3-8 Módulo de la turbina LM2500 [34]

Se caracterizan por poseer una buena relación peso-potencia, proporcionando una potencia de 25 MW al tiempo que alcanzan valores de eficiencia térmica próximos al 36%.

### 3.1.3.1 Componentes principales y funcionamiento

Las turbinas LM2500 son turbinas de eje partido, divididas en dos secciones principales. Por un lado, la sección del generador de gas, que incluye el compresor de flujo axial, la cámara combustión anular y la turbina de Alta Presión; y, por otro lado, la sección de la turbina de Potencia.

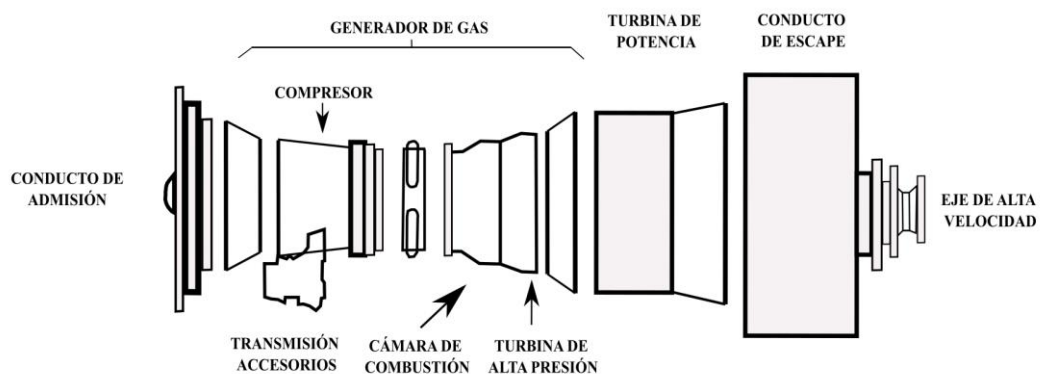


Figura 3-9 Esquema general de la turbina LM2500 (autoría propia)

Las turbinas LM2500 funcionan siguiendo el Ciclo Termodinámico de Brayton, en el que se producen dos transformaciones adiabáticas e isentrópicas y dos isóbaras, siendo los diagramas de Presión-Volumen y Temperatura-Entropía del siguiente modo:

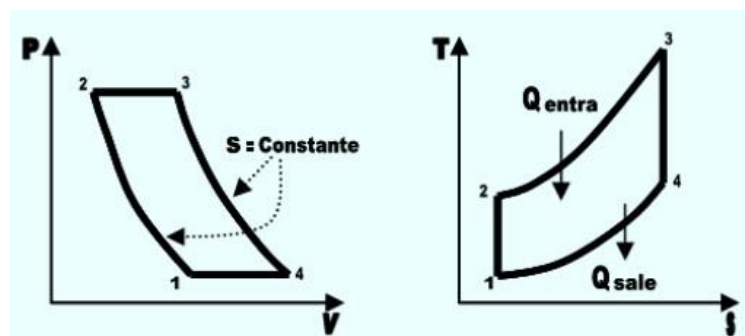


Figura 3-10 Ciclo de Brayton teórico en una turbina de gas [35]

El aire entra a la turbina a través del conducto de admisión y es comprimido en el compresor de flujo axial para después pasar a la cámara de combustión. Aquí se inyecta el combustible y la mezcla es encendida por bujías, provocando un flujo de gases a elevada temperatura y presión. Estos gases son los que primero accionan la turbina de Alta Presión, que a su vez se encarga de mover el compresor, y finalmente accionan la turbina de Potencia, que mediante un sistema de mecanismos reductores se encarga de proporcionar potencia al eje propulsor.

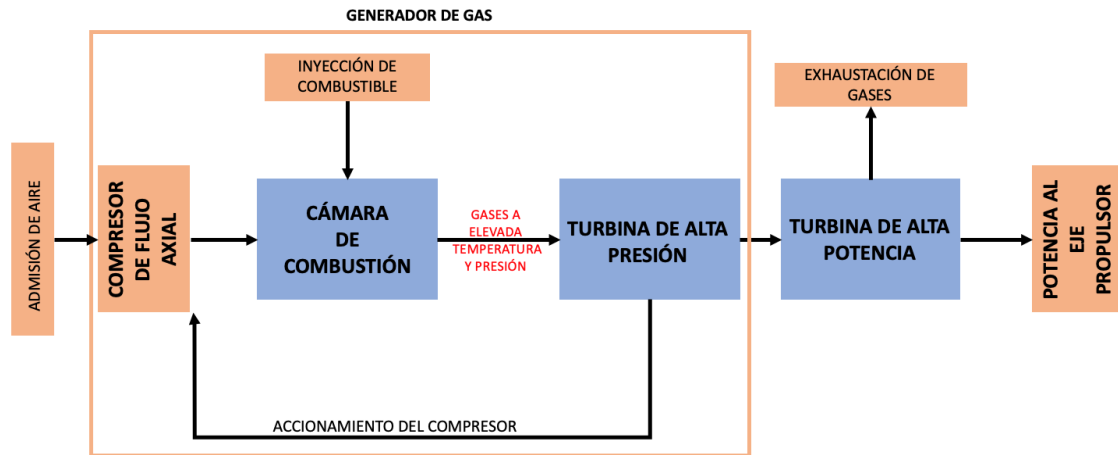


Figura 3-11 Esquema de funcionamiento de la turbina (autoría propia)

Tal y como se aprecia en la Figura 3-8, la turbina de gas se encuentra instalada dentro de un contenedor cuya función es proporcionar aislamiento térmico y acústico. La base del mismo está formada por un bastidor de viguetas de acero en forma de doble "T" y por una placa base de chapa de acero que en conjunto componen una plataforma estable para la turbina.

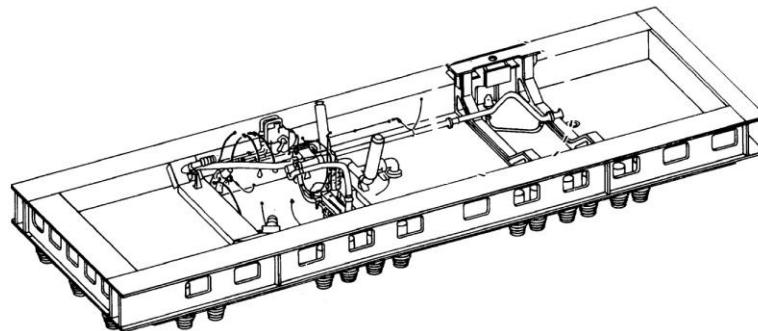


Figura 3-12 Estructura de la base de la turbina LM2500 [34]

El bastidor queda apoyado sobre 32 amortiguadores que, formados a su vez por muelles de acero y topes de neopreno, unen el módulo al buque y absorben las vibraciones. Al mismo tiempo, la turbina queda anclada a la base del contenedor mediante 11 tirantes que ofrecen sujeción vertical, lateral y axial. A mayores, la parte frontal de la turbina queda fijada por un yugo.

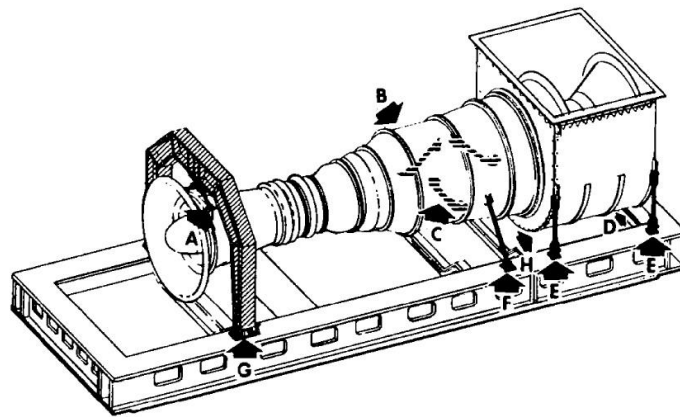


Figura 3-13 Sistema de anclaje de la turbina LM2500 [34]

El contenedor en sí queda formado por paneles de triple capa: una chapa metálica como forro exterior, una capa aislante y una chapa metálica perforada interior resistente al fuego. Cuenta también con dos puertas laterales para el acceso al interior, la admisión del aire primario y secundario de la turbina y el eductor de exhaustación. Además, para evitar pérdidas en la admisión cuenta con un mamparo barrera que actúa de separador estanco; y para prevenir la entrada de objetos extraños e impurezas en la turbina existe una rejilla metálica que actúa como filtro.

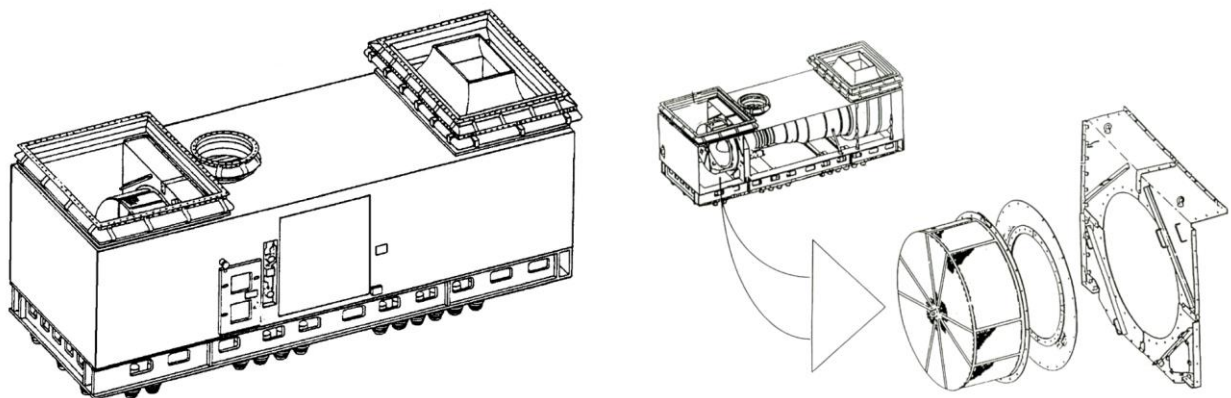


Figura 3-14 Módulo del contenedor y mamparo barrera de la turbina LM2500 [34]

Simultáneamente, el conducto de admisión mejora el rendimiento de la turbina pues proporciona un flujo de aire uniformemente distribuido y libre de turbulencias.

La primera sección de la turbina, conocida como generador de gases, se encarga de proporcionar gases a elevada presión y temperatura, que sean capaces de accionar la turbina de Alta Presión y la turbina de Potencia. A su vez se compone de:

- Compresor: se trata de un compresor de flujo axial de 16 etapas, capaz de alcanzar una relación de compresión de 18:1, que tiene como función comprimir el aire para la combustión. Se divide en rotor y estator y bastidores frontal y posterior.

El rotor está construido con una estructura de carrete y cuenta con 14 paletas de titanio y 2 de acero de gran resistencia A286.

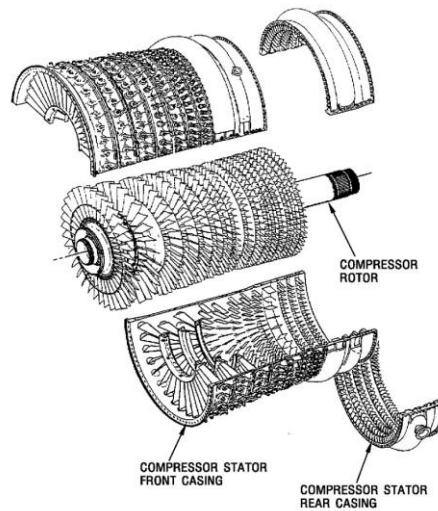


Figura 3-15 Compresor de la turbina LM2500 [34]

Por otro lado, el estator está formado por una corona de paletas fijas/variables (paletas guía), 6 coronas de paletas variables y diez coronas de paletas fijas, divididas en dos carcassas frontales de titanio y dos traseras de INCONEL 718. Cuenta además con un actuador paletas, que mediante unos actuadores laterales pueden regular las paletas guía y las 6 primeras coronas en función de la temperatura y velocidad del aire.

El compresor contiene también tres colectores de sangría que permiten la extracción de aire en diferentes etapas. En la etapa 8 para la presurización y refrigeración de cárteres, en la etapa 9 para la refrigeración de turbina de potencia, y en la etapa 13 para la refrigeración de la turbina de Alta Presión.

- Cámara de combustión: con diseño anular, se encarga del aporte calorífico del Ciclo de Brayton de la turbina de gas. Situada entre el bastidor posterior del compresor y la turbina de Alta Presión, se compone de cono difusor, domo y camisas interior y exterior.

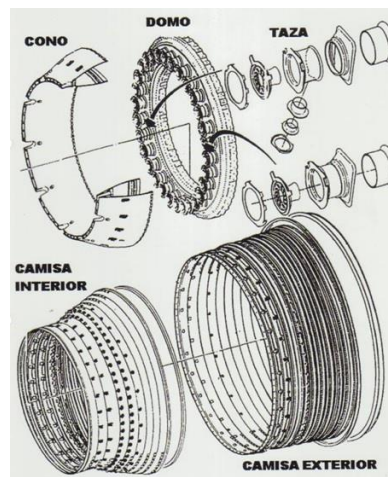


Figura 3-16 Cámara de combustión de la turbina LM2500 [34]

El cono difusor permite el paso uniforme del aire comprimido. El domo supone el soporte de las 30 tazas, una para cada inyector de combustible, que producen la estabilización de la llama y la mezcla aire-combustible. El domo, además, aloja las bujías y los inyectores de combustible, que van unidos a un colector anular de combustible.

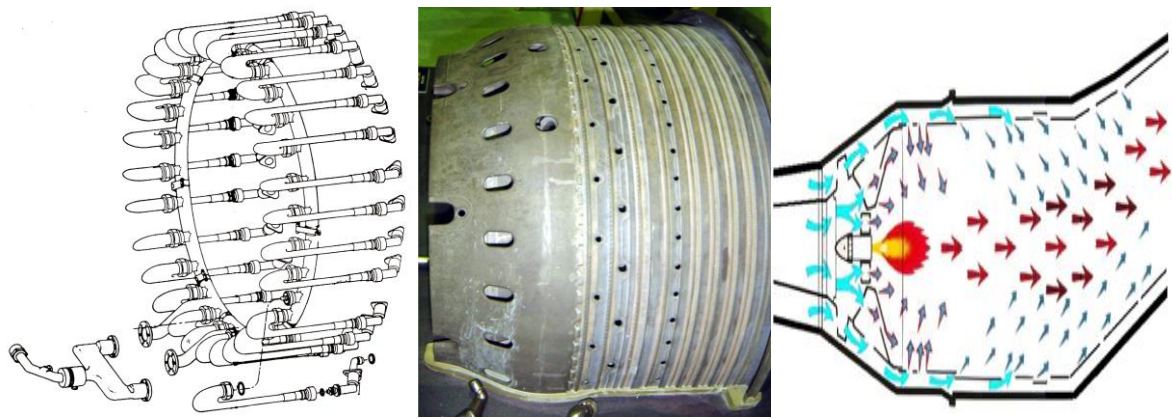


**Figura 3-17 Domo y camisa exterior de la turbina LM2500 [34]**

Las camisas interior y exterior son una serie de anillos superpuestos unidos por soldadura, que presentan orificios de refrigeración por los que circula una película de aire que las protege del calor de la combustión. Incorporan dos sensores de llama que detectan la presencia de las mismas y envían una señal para su monitorización.

- Turbina de Alta Presión: encargada de extraer la energía de los gases de combustión para mover el rotor del compresor, esta turbina está formada un rotor y dos etapas de toberas.

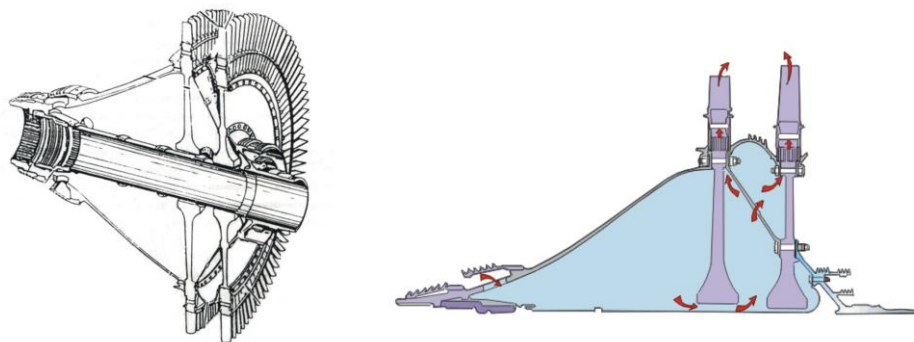


**Figura 3-18 Turbina de Alta Presión de la turbina LM2500 [34]**

El rotor de la turbina queda compuesto por un eje frontal y dos discos de paletas que, refrigeradas por parte del aire que crea corrientes de convección entre ambas, quedan conectados al compresor y le transfieren el par desarrollado.

En lo referente a la sección de la turbina de potencia, se puede incluir en la misma tanto a la turbina de Potencia como a los bastidores, pudiendo estos últimos quedar encuadrados en cualquiera de las dos secciones principales.

La turbina de Potencia es una turbina de acción-reacción de seis etapas que se encarga de extraer la energía de los gases procedentes de la turbina de Alta Presión, que a su vez está formada por un rotor y un estator.

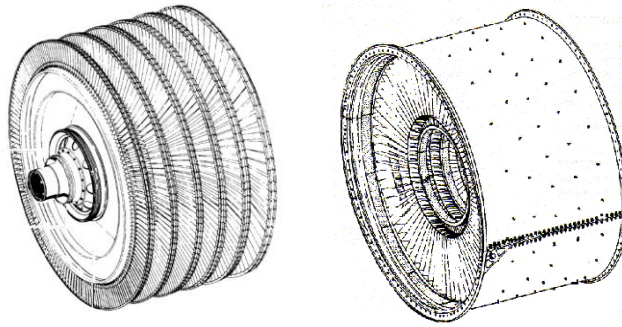


**Figura 3-19 Rotor y estator de la turbina de Potencia de la turbina LM2500 [34]**

El rotor está formado por seis discos, mientras que en el estator se pueden diferenciar una primera corona de toberas que forma parte del generador de gases, y cinco coronas de toberas que arman la totalidad de la turbina. Tras atravesar los gases por esta última etapa, estos son dirigidos a la exhaustación, y de ahí son expulsados por los conductos de escape del buque.

Todos estos componentes de la turbina de gas quedan ensamblados gracias al conjunto de bastidores que permiten la conexión y fijación entre ellos. En el modelos de la turbina LM2500 son cuatro los bastidores que llevan a cabo esta tarea y son los siguientes.

El bastidor frontal del compresor, situado entre el conducto de admisión y el compresor, permite formar una trayectoria de flujo para el aire de entrada del compresor mediante cinco nervios radiales. Construido en acero inoxidable, aloja también sensores de temperatura y presión del aire, así como el sistema de transmisión de accesorios.

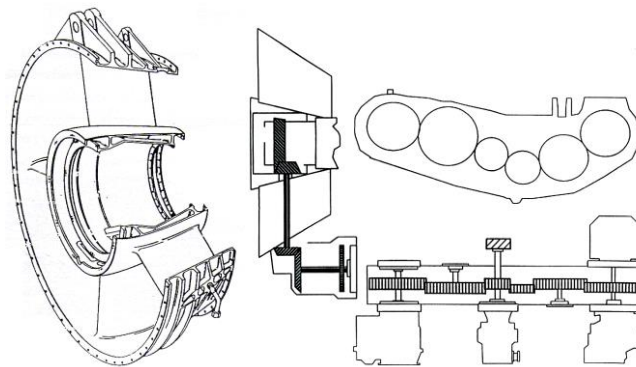


**Figura 3-20 Bastidor frontal y sistema de transmisión de accesorios de la turbina LM2500 [34]**

Al término del compresor se encuentra el bastidor trasero del compresor, en cuyo interior se alojan la cámara de combustión y la primera etapa del rotor de la turbina de Alta Presión. Dividido por diez nervios radiales, forma parte esencial de servicios como el de arranque y el antihielo, y contiene además sensores de temperatura y presión del aire de descarga del compresor.

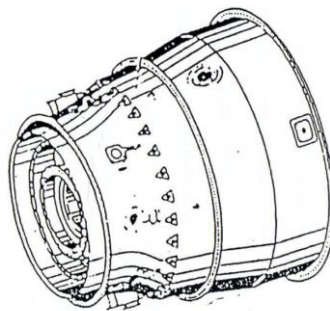


**Figura 3-21 Bastidor trasero del compresor de la turbina LM2500 [34]**

Contiguo a este se encuentra el bastidor central de la turbina, que soporta el eje trasero del rotor de la turbina de Alta Presión. Este hace de difusor llevando los gases desde la turbina de Alta Presión a la turbina de Potencia y da soporte a la primera etapa de toberas de la turbina de Potencia. Además, incorpora un sensor de temperatura y de presión a la entrada de la segunda turbina.

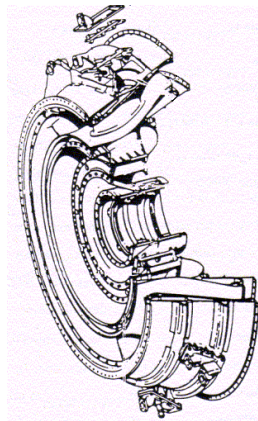


**Figura 3-22 Bastidor central de la turbina LM2500 [34]**

Por último, el bastidor trasero de la turbina soporta el eje trasero del rotor de la turbina de Potencia y forma el conducto de exhaustación de la turbina. Dividido por ocho nervios radiales, incorpora un sensor de revoluciones de la turbina de Potencia

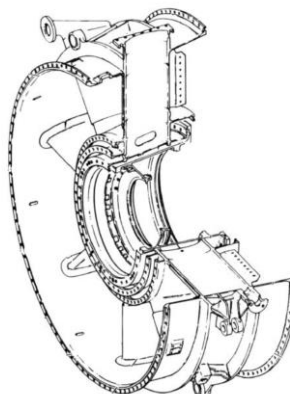


**Figura 3-23 Bastidor trasero de la turbina LM2500 [34]**

### *3.1.3.2 Sistemas auxiliares*

No sería posible el funcionamiento de la turbina de no ser por la existencia de los sistemas auxiliares, que complementan y permiten que estas operen con normalidad. Entre estos cabe destacar:

*Sistema de lubricación:* suministra aceite refrigerado a cárteres y cojinetes con el objetivo de reducir la temperatura en los mismos y evitar la fricción de mecanismos y engranajes. Precisa de un subsistema de suministro que bombea aceite filtrado y limpio, un subsistema de recuperación de aceite de los cárteres y un subsistema de ventilación y presurización que emplea un separador aire-aceite.

*Sistema de combustible:* distribuye y regula el flujo de combustible necesario en el generador de gases para satisfacer las necesidades de potencia y revoluciones requeridas por la turbina. Para ello cuenta con una bomba de combustible, un colector, válvulas de corte de combustible y los atomizadores, que finalmente introducen el combustible en la cámara de combustión.

*Sistema de ignición:* tiene como objetivo inflamar la mezcla aire-combustible en la cámara de combustión. Este sistema funciona como descarga de condensadores, los cuales, a través de dos bujías, aportan la energía eléctrica en forma de chispa capaz de provocar la combustión de la mezcla.

*Sistema de arranque:* compuesto por una turbina neumática y una válvula de aire de arranque, el aire acciona la turbina neumática que arrastra al generador de gases hasta el punto en que este alcanza una velocidad de autosostenimiento, para después desacoplarse y permitir el funcionamiento normal de la turbina.

Además, las turbinas LM2500 incorporan sensores que alertan sobre la presencia de la formación de hielo mediante detectores térmicos y de humedad, así como sensores de fuego, que emplean detectores de llama y activan un sistemas de extinción por inundación con Halón.

### *3.1.4 Ventajas e inconvenientes de la propulsión con turbina de gas*

La turbina de gas como sistema de propulsión supuso un gran avance en la tecnología naval y es por ello que están tan ampliamente extendidas tanto en el mundo civil como en el mundo militar.

Uno de los factores de mayor relevancia a la hora de elegir las turbinas de gas como sistema de propulsión es su elevada relación peso-potencia, siendo este valor muy superior a los de los motores diésel o turbinas de vapor. Por otra parte, permiten alcanzar mayores velocidades, requiriendo menor tiempo de reacción y así como de maniobra. Además, el tiempo de puesta en marcha es reducido ya que no precisa de tiempo de espera para el calentamiento del sistema.

Sin duda también supone una ventaja la confiabilidad de estos sistemas, pues con el escaso número de elementos alternativos y que causen fricción, presentan una vida operativa más larga. Por otro lado, la suavidad del funcionamiento debida a la ausencia de fuerzas desequilibrantes hace que apenas experimenten vibraciones. Además, su diseño modular facilita las inspecciones y reparaciones.

Por último, estos sistemas son elegidos en muchas ocasiones para formar parte de plantas combinadas ya que es sencillo combinarlo con otro tipo de propulsión y es una tecnología muy conocida a día de hoy.

Sin embargo, pese a presentar múltiples ventajas, este sistema de propulsión también muestra inconvenientes que pueden llevar a no optar por esta tecnología a la hora de diseñar una planta propulsora para un buque.

Principalmente, es el elevado consumo específico de combustible el que supone un gran inconveniente, siendo este entre 3 y 9 veces superior al de motores diésel para un mismo régimen de revoluciones. Por otra parte, si las turbinas de gas no operan a plana carga, su rendimiento también cae.

Además, las turbinas de gas emiten grandes niveles de ruidos por lo que es necesario la instalación de módulos de contenedor para poder lograr un aislamiento correcto.

Finalmente, es preciso mencionar también que la elevada temperatura de los gases de exhaustación hace que los barcos, en este caso buques de guerra, sean fácilmente detectados por sistemas térmicos, como los que incorporan los misiles guiados por IR (infrarrojo).

### 3.1.5 La turbina de gas en la Armada Española

Como no podía ser de otro modo, la Armada Española apostó y sigue apostando por la tecnología de las turbinas de gas, pues aporta características muy valiosas a nuestros buques. En nuestra flota podemos encontrar las turbinas de gas formando parte de las plantas propulsoras como elementos propulsores o como generadores de energía.

#### 3.1.5.1 Elemento propulsor (plantas combinadas)

Formando parte de plantas de propulsión combinadas (2.2.5), las turbinas de gas LM2500 figuran en las fragatas de las clases "Santa María" (F-80) y Álvaro de Bazán" (F-100).

En las primeras encontramos en cada unidad 2 turbinas formando un sistema COGAG (Combined Gas And Gas), que aportan una potencia de 30 MW a un único árbol de hélice.



**Figura 3-24 Fragata Numancia (F-83) de la Armada Española [12]**

En las fragatas F-100 las turbinas LM2500 forman parte de un sistema CODOG (Combined Diesel Or Gas), en el que por cada árbol de hélice encontramos una turbina y un motor diésel Bazán Bravo-12, aportando una potencia de 2x17,5 MW (turbinas) y 2x4,6 MW (diésel).



**Figura 3-25 Fragata Blas De Lezo (F-103) de la Armada Española [12]**

Por otro lado, y con vistas al futuro próximo, las nuevas fragatas de la clase "Bonifaz" (F-110), tendrán plantas propulsoras combinadas del tipo CODELAG (Combined Diesel-Electric And Gas), en las que únicamente incorporarán una turbina LM2500.



**Figura 3-26 Prototipo de las futuras fragatas F-110 de la Armada Española [36]**

### 3.1.5.2 Generación de energía

Es en el buque insignia de la Armada, el LHD Juan Carlos I (L-61), donde la turbina LM2500 aparece como elemento generador de energía. La planta propulsora del Juan Carlos I está formada por dos POD de 11 MW, que reciben la energía eléctrica proporcionada por dos diésel generadores MAN 32/40 y una turbina de gas CM2500. Los diésel aportan  $2 \times 5,86$  MW, mientras que la turbina proporciona 14,73 MW.

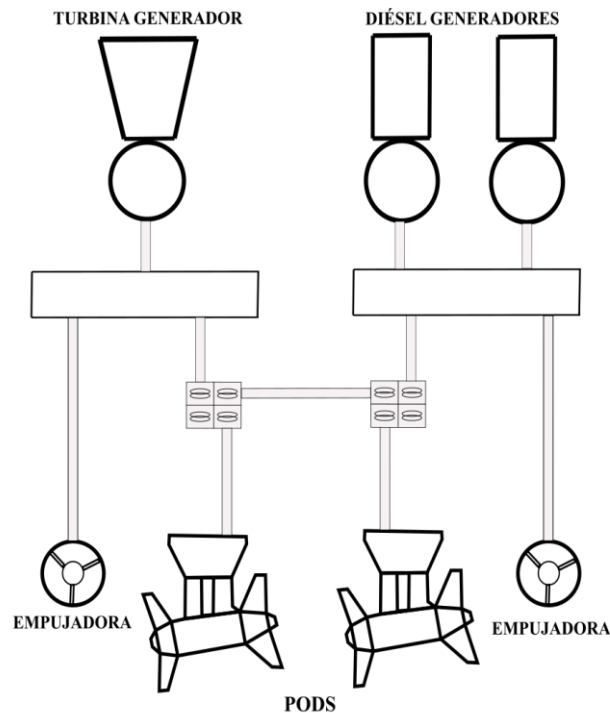


**Figura 3-27 Planta propulsora del LHD Juan Carlos I (L-61) de la Armada Española [12]**

La turbina CM2500 es una variante de las LM2500 en tanto que en principio no es una turbina navalizada, sino una turbina como las empleadas en plantas terrestres para la generación de energía.

## 3.2 Propulsión mediante GNL

Para proceder al estudio del estado del arte relacionado con la propulsión mediante Gas Natural Licuado se va a seguir una estructura como la que se refleja en la siguiente imagen. De este modo se busca profundizar en el conocimiento de esta tecnología para dar paso así a abordar el tema que nos ocupa en este trabajo: la aplicabilidad a la Armada Española.

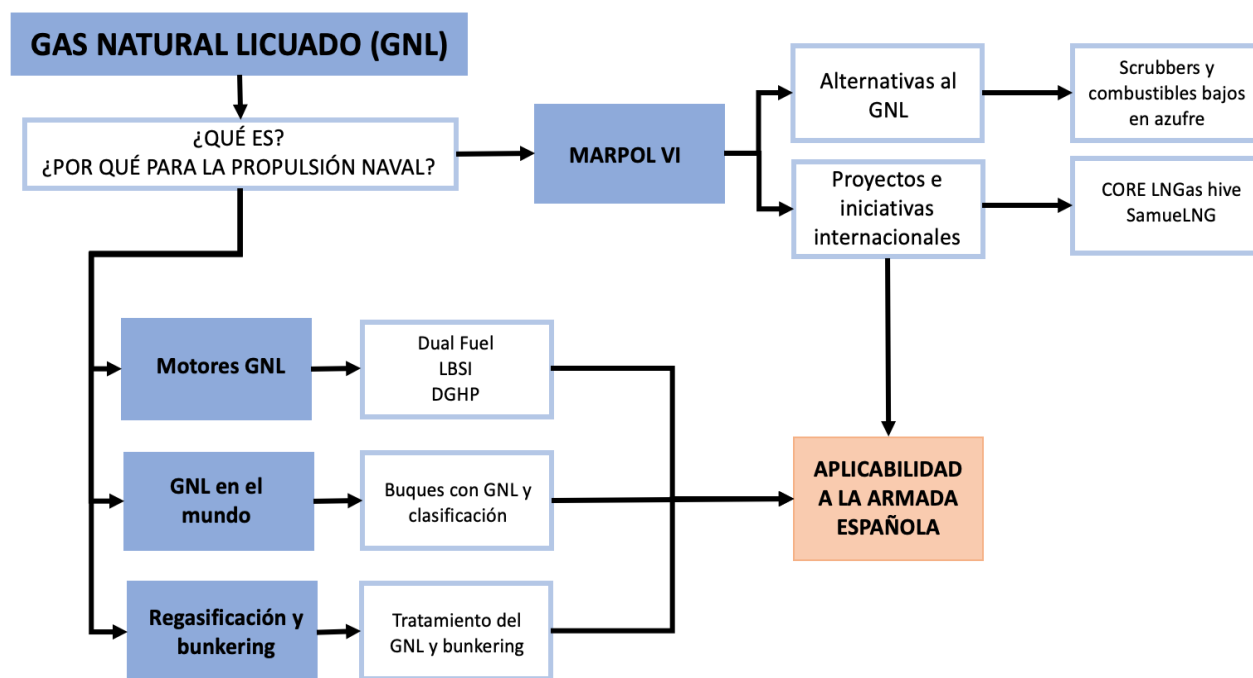


Figura 3-28 Esquema conceptual del GNL (autoría propia)

### 3.2.1 ¿Qué es GNL?

El Gas Natural Licuado (GNL) es el resultado de procesar gas natural para lograr su estado líquido. Con una composición química de 98% Metano, 0,9% Nitrógeno, 0,8% Etano, 0,2% Propano y 0,1 Dióxido de Carbono, el GNL es el combustible llamado a ser la alternativa en la propulsión naval del futuro más próximo.

Se trata de un gas inodoro, incoloro, no tóxico y cuya densidad relativa respecto al agua es de 0,45. El GNL se condensa a partir de  $-161^{\circ}\text{C}$  (a presión atmosférica), en un proceso denominado "licuefacción"; proceso que permite reducir su volumen en una proporción 1/600, lo cual es idóneo para el transporte y el almacenamiento de grandes cantidades del mismo.

### 3.2.2 ¿Por qué GNL?

Dado que el transporte marítimo representa alrededor del 90% del comercio mundial, la necesidad de combustibles más respetuosos con el medioambiente que sean alternativos a los actuales es una realidad.

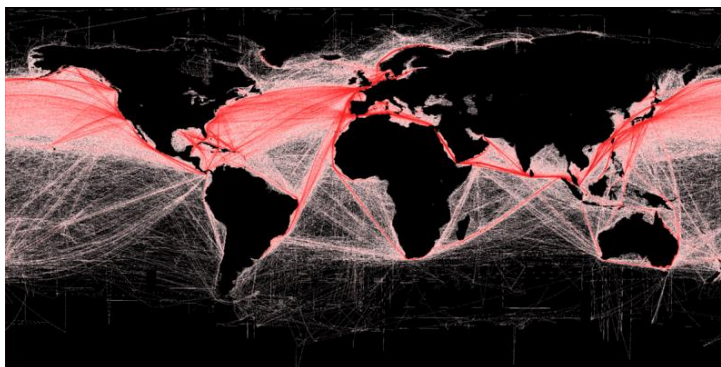


Figura 3-29 Rutas marítimas comerciales a nivel global [37]

El GNL se ha establecido como el combustible idóneo para la propulsión naval en el futuro más próximo, pues permite cumplir con las estrictas políticas de emisiones de gases y partículas contaminantes existentes en la actualidad. Su uso permite la reducción de emisiones de óxidos de

azufre (SOx) y Material Particulado (PM) casi al 100%, así como de óxidos de nitrógeno (NOx) al 85%, posibilitando además la disminución de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en torno al 30%.

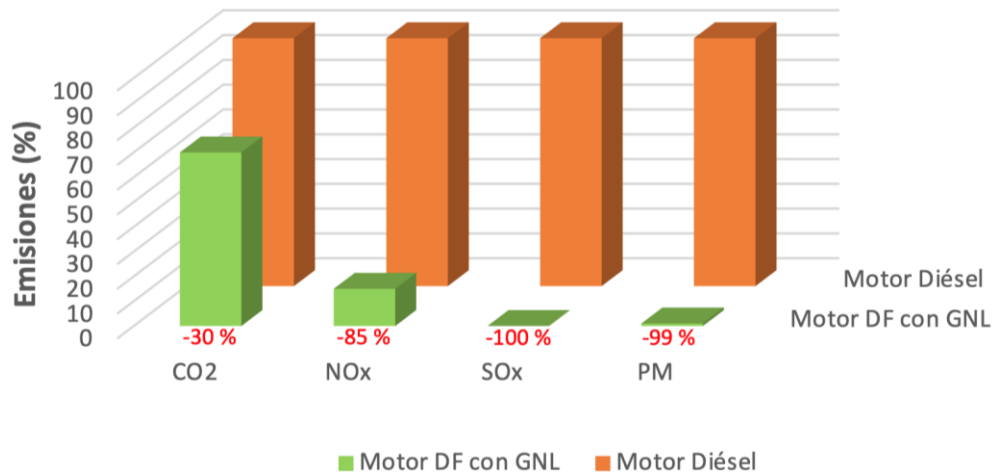


**Figura 3-30 Gráfica de reducción de emisiones al emplear GNL (autoría propia basado en [38])**

De este modo, los buques que emplean este tipo de combustible cumplen con los requisitos establecidos por la OMI (Organización Marítima Internacional) recogidos en el convenio MARPOL (Anexo VI), que establece las reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques.

Por otra parte, el factor económico es de gran peso a la hora de decantarse por el GNL como la alternativa a la propulsión. Dado que el combustible representa alrededor del 50% de los costos de operación de un buque, el precio de los mismos es un factor muy determinante.

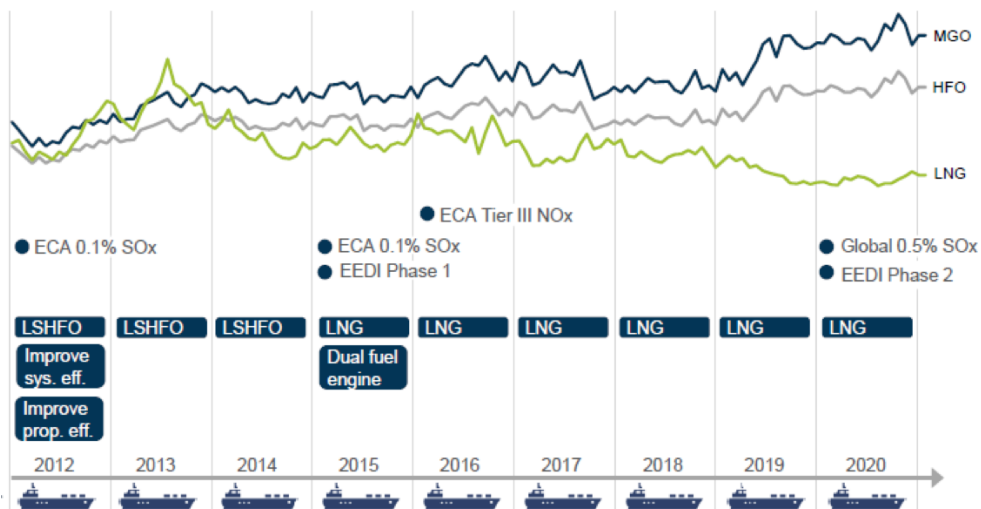


**Figura 3-31 Comparativa de precios de distintos combustibles con el GNL [39]**

Tal y como se aprecia en la gráfica, el precio del gas natural desde el comienzo de la pasada década se ha mantenido muy inferior al precio de otros combustibles empleados en la propulsión naval, como el Heavy Fuel Oil.

Pese a suponer una clara ventaja, las navieras y armadores no solo tienen en cuenta el coste del combustible en sí, sino que buscan una red de distribución estable del mismo e instalaciones portuarias que la soporten. Y es en este punto donde esta tecnología encuentra uno de sus principales obstáculos.

Sin embargo, existen varios proyectos de cooperación internacional, los cuales están ya en marcha, para fomentar e impulsar la industria del GNL, los cuales se abordarán más adelante.

### 3.2.2.1 MARPOL Anexo VI

En este convenio internacional establecido por la OMI se establecen los límites de las emisiones de NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y PM en zonas específicas donde se busca reducir la contaminación atmosférica, conocidas como Zonas de Control de Emisiones (*Emission Control Areas-ECAs* en inglés). Estas son: Zona del mar Báltico (solo para SO<sub>x</sub>). Zona del Mar del Norte (solo para SO<sub>x</sub>), Zona de Norteamérica (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y PM) y Zona del Mar Caribe de los Estados Unidos (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y PM).



Figura 3-32 Mapa mundial con la distribución de las ECA's [40]

Como se aprecia en la imagen, encontramos en rojo las actuales ECAs, y señaladas en naranja posibles regiones que en un futuro podrían ser recalificadas como nuevas ECAs, pues son consideradas de interés medioambiental debido al denso tráfico que por ellas circula.

Para poder cumplimentar las restricciones impuestas sobre la emisión de contaminantes, las ECAs han ido incrementando los límites de estas de manera gradual, con el objetivo de lograr su implementación por parte de la totalidad de los buques que navegan por estas zonas.

Siguiendo la normativa vigente a día de hoy, y desde el 1 de enero de 2015, la cantidad máxima de azufre que puede estar presente en el fueloil empleado para la propulsión de los buques es de menos de un 0,1% (expresado en peso en términos de % m/m) dentro de las ECAs. En el caso de las zonas fuera de estos límites, y desde el 1 de enero de 2020, la cantidad máxima permitida es de menos de un 0,5%.

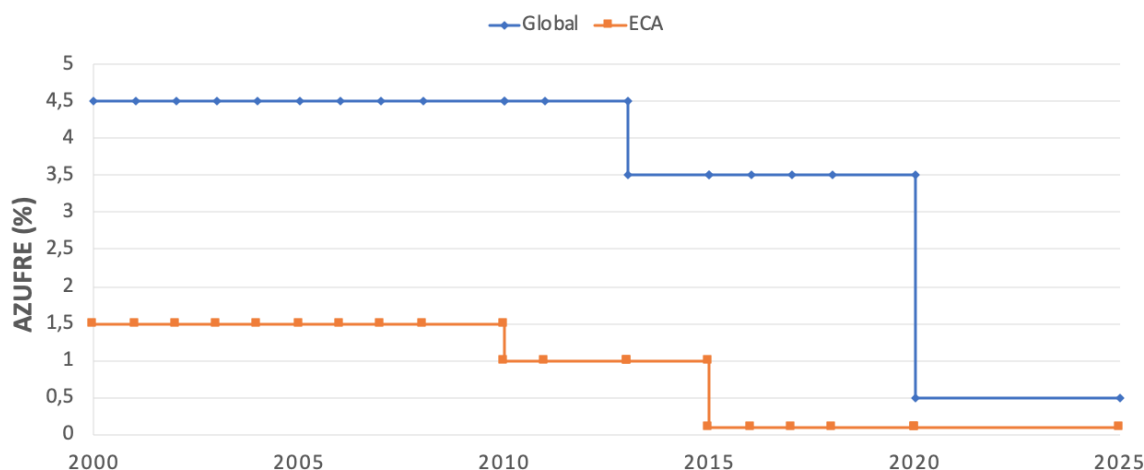


Figura 3-33 Gráfica de los límites de emisiones SO<sub>x</sub> (autoría propia basado en [41])

En cuanto a los límites referentes a las emisiones NO<sub>x</sub>, la normativa vigente hace distinción en tres niveles (o *Tiers* en inglés) para los buques que incorporan motores diésel en su propulsión, y que proporcionan una potencia de 130KW o superior y hayan sido instalados con posterioridad al 1 de enero del año 200.

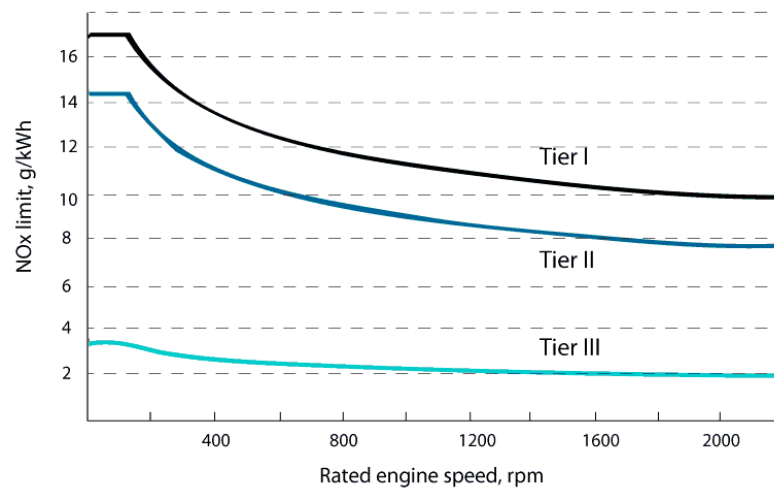


Figura 3-34 Gráfica de los límites de emisiones NO<sub>x</sub> [42]

El primer nivel establece los límites para los motores diésel instalados en buques de construcción entre el 1 enero del año 2000 y el 1 de enero de 2011. El segundo nivel recoge las restricciones para los motores diésel instalados en buques de construcción posterior al 1 de enero de 2011 y, además, supone el límite de emisiones para las zonas marítimas que no conforman una ECA. Por último, el tercer nivel incluye a los motores diésel instalados en buques de nueva construcción posterior al 1 de enero de 2016 y supone también las restricciones impuestas a mayores dentro de las ECAs.

### 3.2.3 Alternativas al GNL

Cierto es que a priori el GNL supone la alternativa idónea para cumplir con todas las restricciones, pero también se han desarrollado otras opciones que permiten a las navieras seguir cumpliendo con la política de emisiones vigente. Entre ellas se encuentran el uso de depuradores de gases de escape y el empleo de combustibles de bajo contenido en azufre.

#### 3.2.3.1 Depuradores de gases de escape (Scrubbers)

Las depuradoras de gases de escape (*scrubbers* en inglés) son sistemas de depuración que eliminan el azufre de los gases de escape y reducen las emisiones de PM a la atmósfera. Sin embargo, estos sistemas no reducen las emisiones de NO<sub>x</sub>, por lo que a mayores es necesario incluir otro equipo para el tratamiento de estos contaminantes.

Dentro de la tecnología de los *scrubbers* encontramos dos ramas principales: los húmedos, que emplean agua para disolver los SO<sub>x</sub>; y los secos, que no requieren de agua en el proceso. tratan los gases de exhaustación con hidróxido de calcio granulado.

Los *scrubbers* húmedos hacen pasar los gases de exhaustación a través del agua, provocando una reacción química que permite eliminar las partículas de SO<sub>x</sub>. A su vez dentro de los húmedos se pueden encontrar tres variantes, en función del tipo de agua empleada.

En primer lugar, los *scrubbers* de ciclo abierto, que emplean el agua del mar para la depuración de los gases. En estos sistemas el agua residual es tratada antes de ser devuelta al mar, con el objeto de evitar el vertido de partículas y almacenar los residuos para después ser recogidos en puerto.

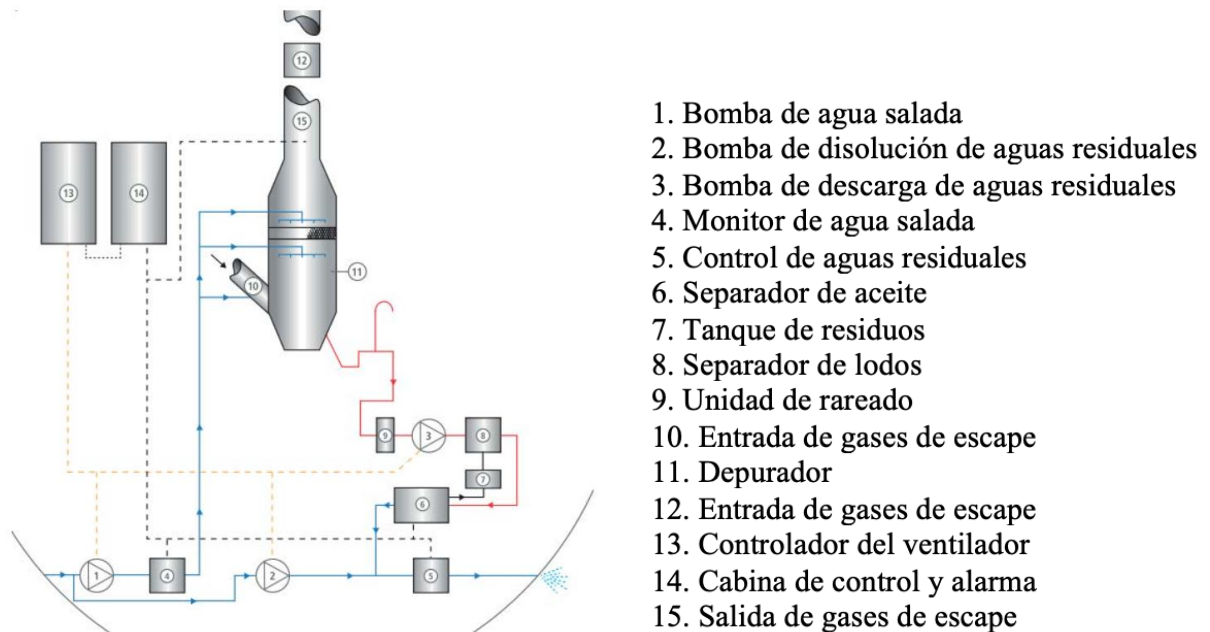


**Figura 3-35 Scrubber de ciclo abierto [43]**

En segundo lugar, los *scrubbers* de ciclo cerrado, que emplean agua dulce tratada con sosa cáustica para la depuración de los gases de exhaustación. En estos sistemas, el agua residual requiere de tratamiento especial para poder volver a ser recirculada en el circuito. Al igual que en los de ciclo cerrado, los residuos obtenidos en el proceso son almacenados a bordo para su posterior reciclaje una vez en puerto.

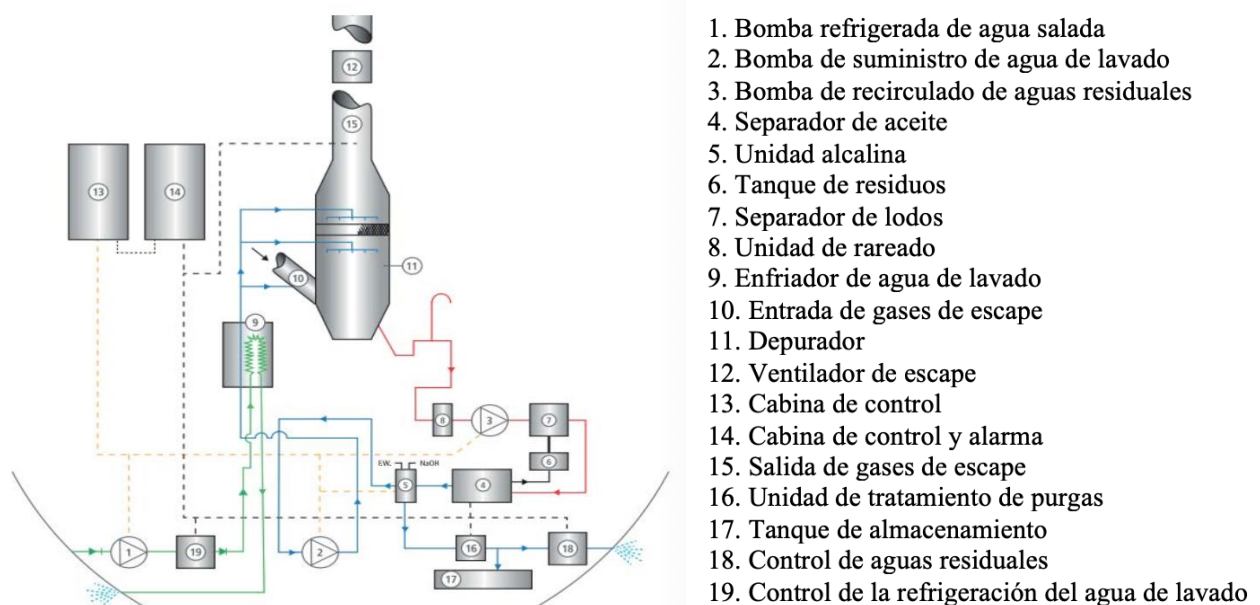


**Figura 3-36 Scrubber de ciclo cerrado [43]**

Y, por último, dentro de los *scrubbers* húmedos, encontramos una alternativa mixta a las dos explicadas anteriormente, los *scrubbers* híbridos, que permite hacer acopio de las ventajas de cada uno de los sistemas anteriores, pudiendo hacer uso del ciclo cerrado en zonas próximas a costa o donde la legislación pertinente así lo exija; y del ciclo abierto en zona donde no haya tales exigencias medioambientales. Sin embargo, esto implica una mayor complejidad en sistema híbrido.

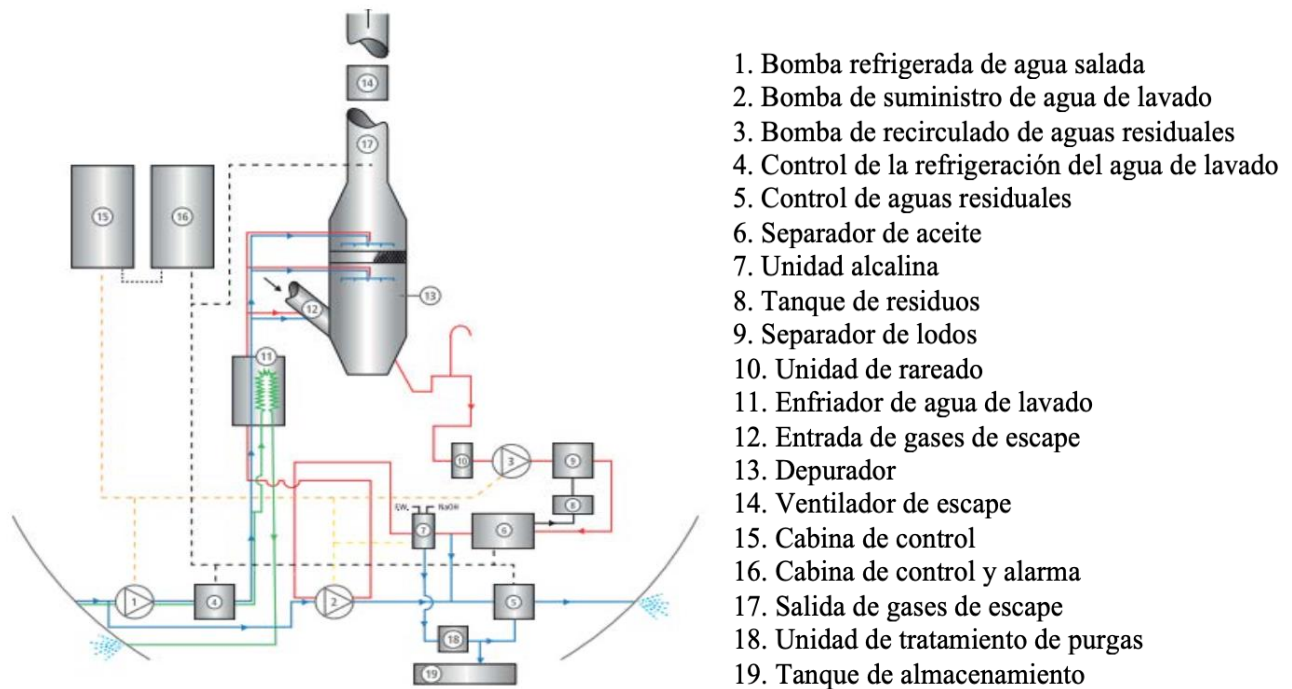


Figura 3-37 Scrubber híbrido [43]

Por otra parte, los *scrubbers* de tipo seco, en vez de emplear agua, tratan los gases de exhaustación mediante la exposición de los mismos a hidróxido de calcio granulado. Como resultado de la reacción química que tiene lugar en un absorbedor, se obtiene un yeso no tóxico que es almacenado a bordo hasta poder ser descargado en puerto. De este modo se eliminan las descargas al mar y además se consigue la reducción de emisiones NOx.

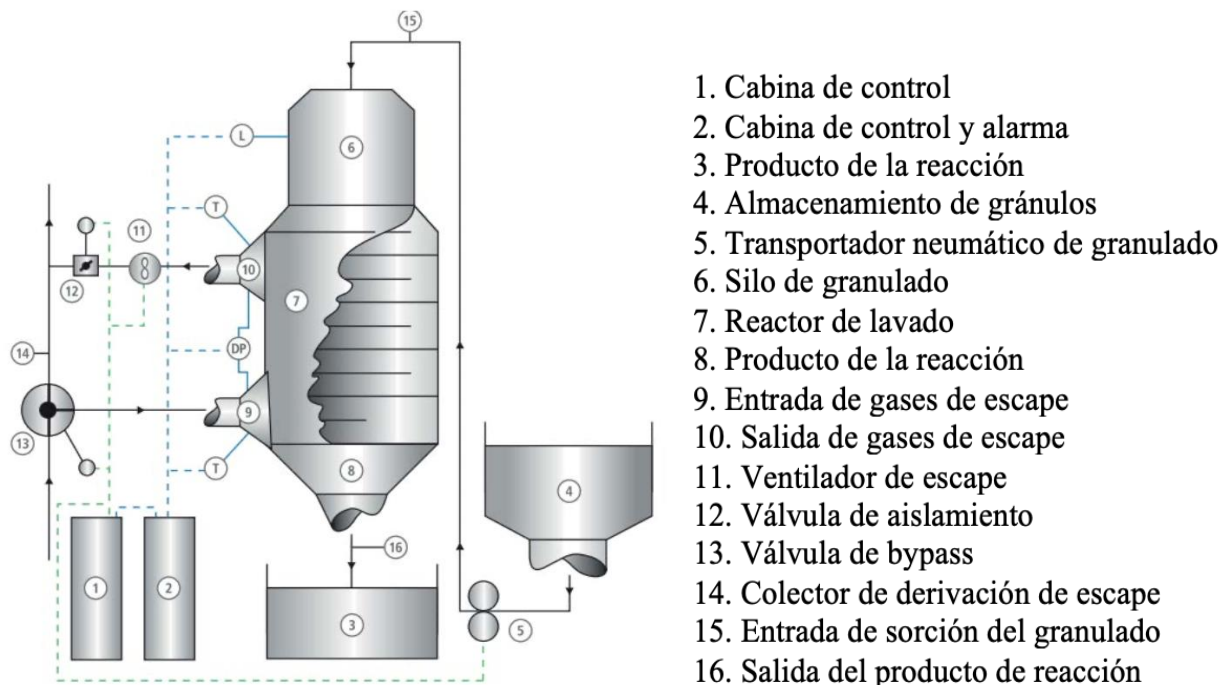


Figura 3-38 Scrubber de tipo seco [43]

Una de las principales ventajas de los scrubbers es que permiten el empleo de Fuel Oil Pesado (*Heavy Fuel Oil-HFO* en inglés) en la propulsión, siendo este combustible notablemente más barato que los combustibles de bajo contenido de azufre y, además, cuya cadena de suministro está

plenamente difundida y operativa. Se trata de una tecnología probada que, sin embargo, requiere de una importante inversión económica pues los costes de instalación son elevados.

### 3.2.3.2 Combustibles de bajo contenido en azufre

La segunda alternativa al GNL pasa por el empleo de combustibles de bajo contenido en azufre como el MGO (*Marine Gasoil-MGO* en inglés) o el VLSFO (*Very LowSulfure Gasoil-VLSGO* en inglés). Se trata de la opción más elegida hasta el momento por las navieras y armadores, pues las modificaciones que ha de realizarse en los motores son mínimas y, económicamente hablando, requieren menos inversión que la adaptación al GNL o la instalación de scrubbers.

El empleo de VLSFO o MGO combustible permite cumplir con las políticas de emisiones en lo que a SOx y PM se refiere, pero a pesar de ello, sigue siendo necesaria la introducción de sistemas de catalizadores para reducir las emisiones de NOx.

Sin embargo, el principal inconveniente que presentan el VLSFO o MGO es su elevado precio en comparación con otros combustibles marinos, como el IFO-380 (uno de los principales tipos de HFO).

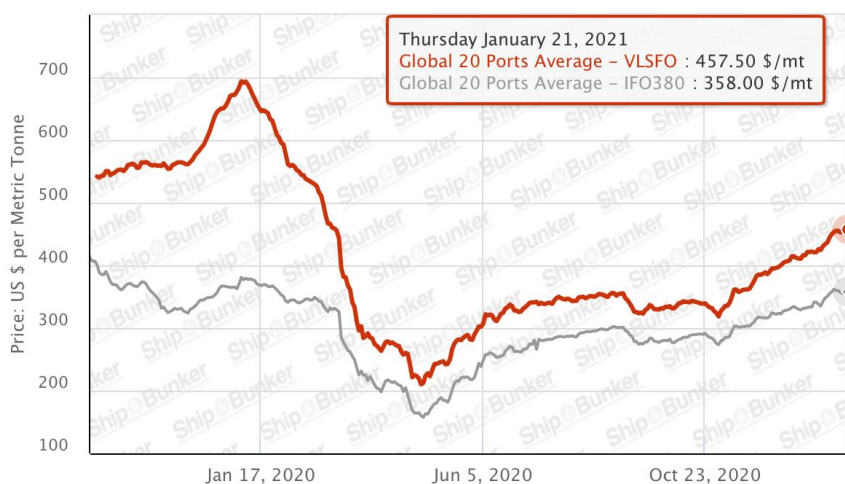


**Figura 3-39 Evolución del mercado actual de IFO-380 y VLSFO [44]**

Tal y como se puede apreciar en la gráfica, que muestra la evolución del mercado de ambos combustibles a lo largo del último año en los 20 puertos principales de venta del mundo, el precio actual del VLSFO supera al IFO-380 en torno a los 100 dólares por tonelada de combustible.

Es por ello que, en previsión del aumento del precio de los mismos, el del VLSFO crezca en mayor medida, aumentando la brecha ya existente entre ambos combustibles, que en anteriores ocasiones llegó a oscilar entre un 40% y un 50% del total.

El alto precio de los combustibles de bajo contenido de azufre hace que, de cara a un futuro próximo, en el que nuevas y más estrictas políticas de contaminación ambiental afectarán seriamente al sector marítimo, se mire al GNL como la apuesta más favorable en lo que combustibles para propulsión marina respecta.

### 3.2.4 Proyectos e iniciativas GNL internacionales

Ante el desafío que supuso la entrada en vigor de las políticas de emisiones de contaminantes a nivel mundial, el panorama internacional dio un paso al frente y decidió aunar esfuerzos para plantear un apuesta futura, viable y realista para desarrollar la propulsión mediante GNL.

En el marco europeo, la política medioambiental de la Unión Europea (UE) viene perfectamente definida en tres palabras "Smart, Sustainable and Inclusive". Traducido al castellano las palabras serían "Inteligente, Sostenible e Integrador".

Siguiendo estas tres pautas, la UE busca fomentar una política medioambiental que fortalezca el desarrollo tecnológico basándose en el conocimiento y la innovación. Para ello los esfuerzos se dirigen hacia la reducción de emisiones contaminantes, con el firme objetivo de lograr una sociedad más respetuosa con el medioambiente. Además, esta política va dirigida también a la potenciación de la creación de empleo que favorezca el crecimiento económico y el progreso social, mejorando al mismo tiempo la competitividad en los mercados internacionales. [45]

Para llevar a cabo estas políticas, la UE ha materializado su apuesta por el GNL a través de varios proyectos destinados a romper las principales barreras que impiden el crecimiento y desarrollo de este combustible. Entre estos proyectos cabe destacar dos de ellos, en los que España se ve activa y ampliamente involucrada: CORE LNGas hive y S/F SamueLNG Project.

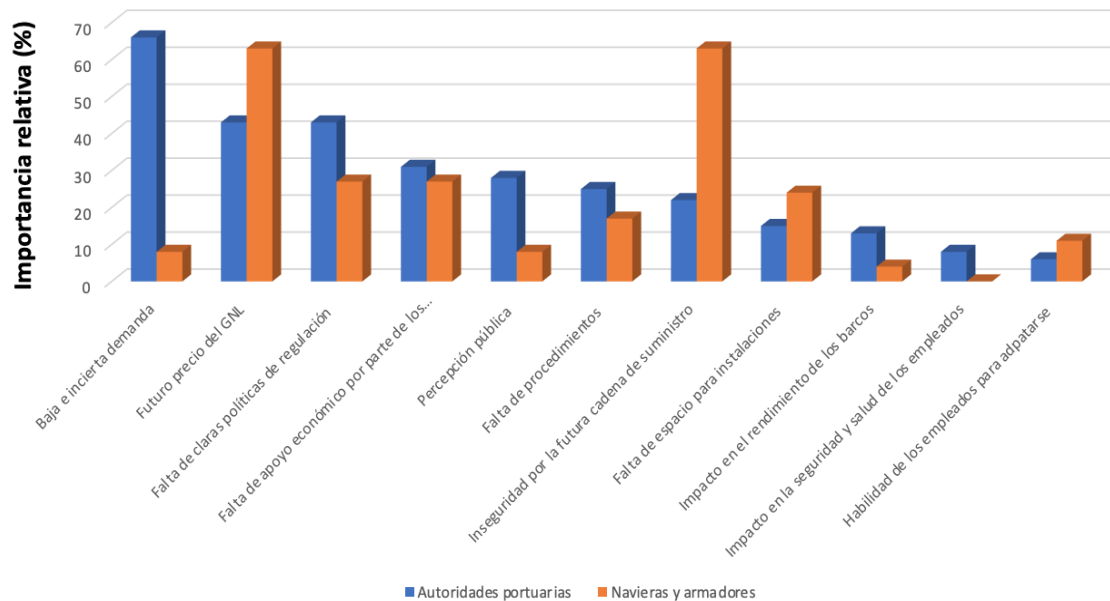


**Figura 3-40 Principales barreras del GNL (autoría propia basado en [46])**

En un estudio realizado por la empresa española Enagás, llevado a cabo entre las principales navieras, armadores y autoridades portuarias del panorama marítimo internacional, quedó reflejado que las principales barreras que impiden el auge del GNL como combustible marítimo son la incertidumbre por el futuro precio del mismo, la inseguridad por la cadena de suministro, así como la falta de apoyo por parte de los gobiernos y la falta de claras políticas de regulación sobre el GNL.

Es en vista de estas preocupaciones por parte del sector marítimo cuando surgen los proyectos mencionados anteriormente.

#### 3.2.4.1 Proyecto CORE LNGas hive

Este proyecto de la UE fue lanzado en 2014 bajo el marco de la iniciativa "Clean Power for Transport" (Energía limpia para el transporte) y tiene como objetivo potenciar el crecimiento de la cadena logística del GNL en la Península Ibérica. Para ello se centra en un desarrollo a pequeña escala y en el "bunkering", buscando la eficiencia y la competitividad de mercados.

Se opta por la Península Ibérica, pues su localización geográfica es clave en el mundo del transporte marítimo, además de poseer la infraestructura gasista necesaria para llevarlo a cabo. Tanto es así, que son más de una decena los puertos españoles que se ven involucrados en actividades relacionadas con el GNL de la mano del *CORE LNGas hive*.



**Figura 3-41 Mapa de la Península Ibérica con actividad CORE LNGas hive [47]**

Con esta iniciativa se da un paso adelante en la lucha por la reducción de emisiones contaminantes, fomentando la utilización del GNL como combustible eco-friendly.

### 3.2.4.2 S/F *Samuel LNG Project*

Este proyecto, cuyo nombre completo es Spanish-French Sustainable Atlantic Motorways of the seas Using as fuel for Engine LNG, tiene como objetivo potenciar el empleo de GNL en buques de mediano y pequeño tamaño como combustible marino. Centrado en los puertos españoles de Vigo y Gijón, y en los puertos franceses de Nantes, Le Havre y Rouen, esta alianza fija entre sus iniciativas el estudio del impacto medioambiental de la aplicación del GNL en estos puertos, así como el estudio de una unidad móvil para "bunkering" en el puerto de Gijón y un buque para realizar "bunkering" en el puerto de Vigo.

Además, este proyecto persiguió también la modificación de la planta propulsora de un buque francés para operaciones de dragado, el *Samuel de Champlain*, que pasó de emplear motores diésel, a incorporar motores de dual-fuel, siendo estos propulsados por MDO y GNL.



**Figura 3-42 Samuel de Champlain (Francia) antes y después de su remotorización [48]**

También es preciso mencionar otros proyectos de gran relevancia internacional, como la red TEN-T o el Baltic Sea Region Programme, que fueron los primeros en impulsarse y sirvieron de referente a la hora de establecer líneas de acción en los mencionados anteriormente.

Tal ha sido el impacto de los proyectos enfocados a promover el GNL que, a día de hoy, los datos referentes al empleo de esta tecnología como combustible para la propulsión marítima son prometedores y positivos.



**Figura 3-43 Mercado del GNL en puertos, navieras y armadores (autoría propia basado en [46])**

Como se puede apreciar, casi el 70% de las autoridades portuarias internacionales de gran relevancia incorporan o lo harán en un plazo menor a 5 años instalaciones para poder suministrar GNL a los buques. Buques de los que, según los datos aportados por navieras y armadores, un 24% incorporan tecnología GNL y un 16% lo harán a lo largo del próximo lustro.

### 3.2.5 Tipos de motores propulsados por GNL

En la actualidad son múltiples los fabricantes de motores que han desarrollado distintas configuraciones de motores que emplean el GNL. Entre estas, las compañías de mayor prestigio y cuyos motores están más extendidos, se encuentran MAN Energy Solutions, Mitsubishi, Rolls-Royce y WÄRTSILÄ... entre otros.

Pero todos estos motores se pueden agrupar bajo tres principales categorías:

#### 3.2.5.1 Lean Burn Natural Gas Spark Ignition Engine (LBSI):

Se trata de los motores de combustión interna de GNL de encendido por chispa con exceso de aire. En estos motores, diseñados únicamente para el empleo de GNL como combustible, se suministra el gas a baja presión (4-5 bar) a una precámara de combustión donde recibe la chispa que provoca la combustión, previo a ser introducido al cilindro.

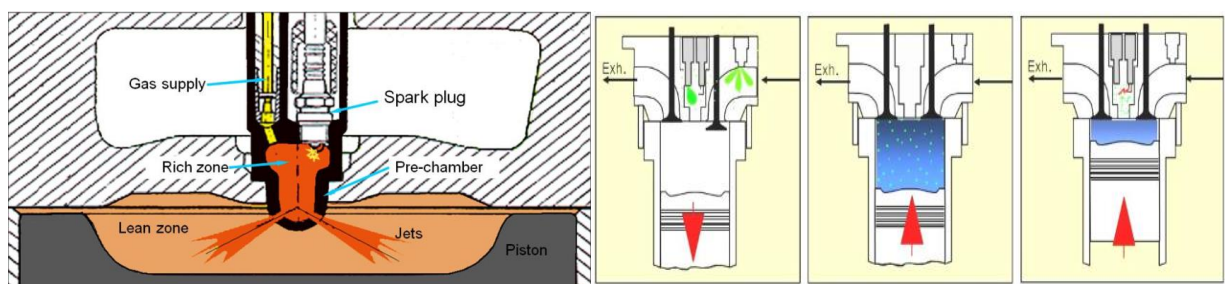


**Figura 3-44 Ciclos del motor LBSI [49]**

Pese a presentar elevados valores de eficiencia energética, incluso superiores a los motores diésel, este tipo de motores no está muy extendido al no ser posible la adaptación o reconversión de motores actuales ya existentes.

Un claro ejemplo de este tipo de motores son los modelos de la clase B35:40 de la marca Rolls-Royce. Estos motores, que admiten configuraciones de 12, 16 y 20 cilindros en V, pueden entregar potencias de hasta 9,62 MW.



**Figura 3-45 Motor B35:40 de Rolls-Royce [33]**

Se trata de motores robustos a la vez que sencillos, que con un bajo consumo de energía entregan elevadas potencias, manteniendo una eficiencia térmica del 49%.

### 3.2.5.2 Diesel Ignited Dual-Fuel Engine (DF)

Este tipo de motores está diseñado para funcionar con ambos diésel y GNL como combustible. En el caso del empleo del GNL como combustible principal, es necesaria la introducción de una pequeña cantidad de combustible diésel para provocar la combustión, siendo la proporción 98% GNL y 2% diésel.

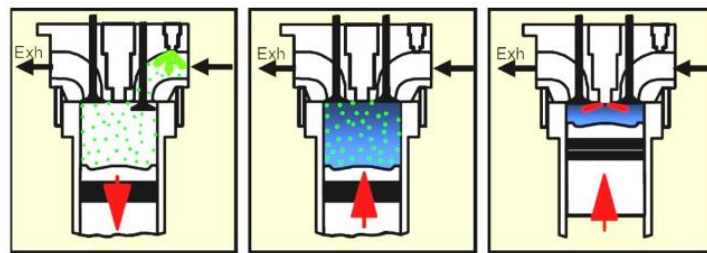


**Figura 3-46 Ciclos del motor Dual Fuel [49]**

Este tipo de motores son los más extendidos actualmente dada la flexibilidad en el empleo de los combustibles y, además, es posible implementarlos a través de un proceso de reconversión.

De estos motores cabe destacar a la familia de los 50DF de WARTSILA, que con configuraciones de 6,8 y 9 cilindros en línea o 12, 16 y 18 cilindros en V, llegan a poder entregar potencias de hasta 17,5 MW.



**Figura 3-47 Motor 50DF [50] y buque Bit Viking [51]**

Ejemplo de estos lo encontramos en el buque quemi-quero "Bit Viking", que incorpora dos motores 50DF de 18 cilindros en línea que le proporcionan una potencia de 2x5,7 MW.

### 3.2.5.3 Direct Gas Injection High Pressure Engine

Se trata de los motores de inyección directa de combustible a elevada presión (300-350 bar). En ellos se logra conseguir mantener el rendimiento de motores de combustión diésel mediante la introducción del GNL junto a una mínima cantidad de diésel (MDO-HFO) para provocar la combustión.

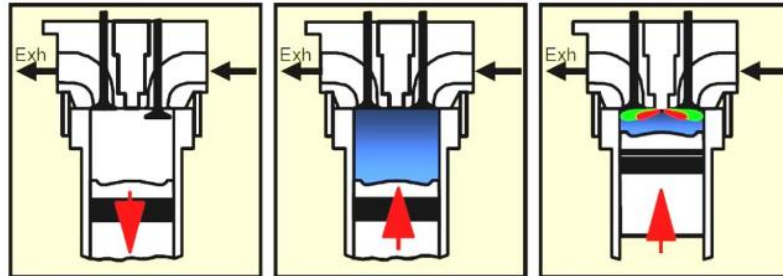


Figura 3-48 Ciclos del motor de Inyección Directa a Elevada Presión [49]

Este tipo de motores puede ser logrado a partir de la reconversión de motores diésel ya existentes. Sin embargo, en ellos la combustión de los combustibles es tal que se emiten cantidades de NOx no compatibles con el cumplimiento del Tier III.

Entre estos cabe destacar la apuesta que realizó la compañía MAN Energy Solutions por los motores de la serie MAN B&W ME-GI, que permiten desarrollar potencias de hasta 82,4 MW en su versión más eficaz.



Figura 3-49 Motor MAN B&W ME-GI [50] y buque Clase Marlin [52]

Ejemplo de ellos, son los equipados por los cargueros de la clase Marlin de la compañía TOTE, que fue una de las primeras en apostar por esta tecnología.

### 3.2.6 Estado actual de la propulsión con GNL

El número de buques propulsados mediante GNL ha experimentado un crecimiento positivo durante la última década. A día de hoy son 178 los buques que emplean GNL como combustible. Además, están ya en proceso de construcción 51 nuevos buques. Y, por otra parte, se conoce que son 126 los buques que, interesados en una reconversión o remotorización de su sistema propulsor, han resultado favorables en el estudio de la viabilidad de adaptación al GNL.

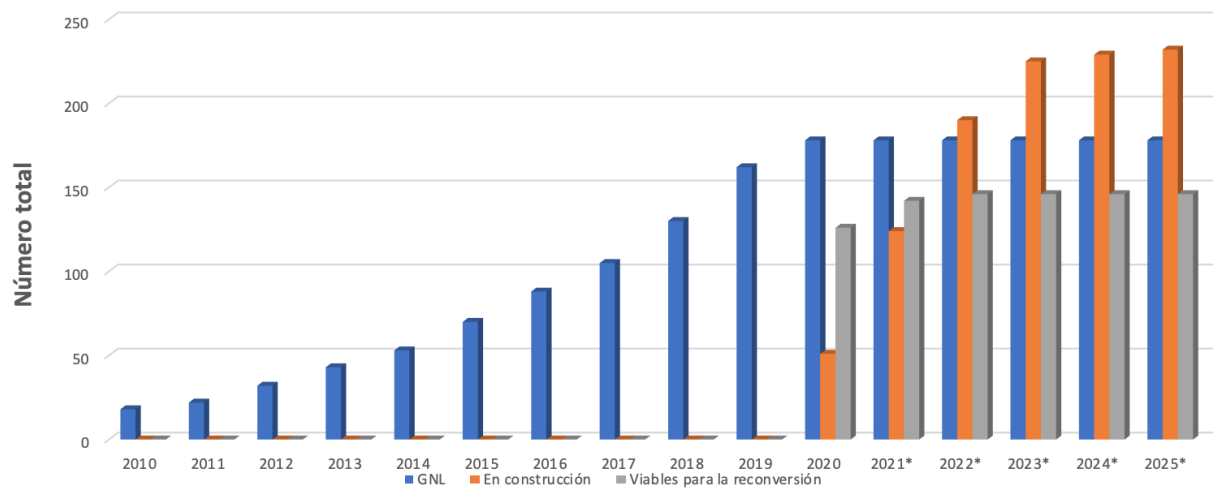


**Figura 3-50 Buques GNL en la actualidad (autoría propia basado en [53])**

De entre todos estos buques, los más dominantes son los ferris, con 42 unidades en funcionamiento. También encontramos un amplio número de buques de aprovisionamiento, así como de quemiqueros. Los menos representados, aunque con expectativas de crecer en los próximos años, son los cruceros de pasajeros, con 4 unidades activas de momento.

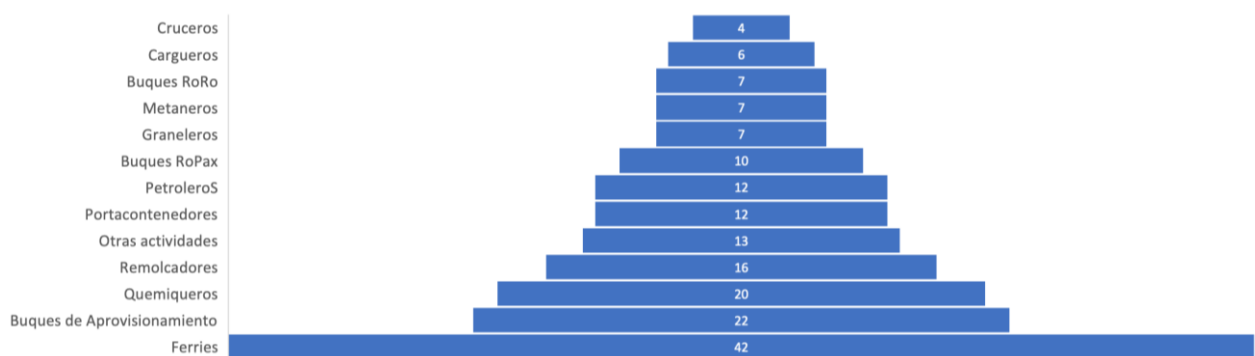


**Figura 3-51 Distribución de los buques GNL según tipo (autoría propia basado en [53])**

Sin embargo, como era de esperar, no están equitativamente repartidos por el mundo. La gran mayoría de ellos los encontramos navegando en las zonas donde las restricciones medioambientales son más estrictas (ECAs). Es por ello que el 67% de los buques a GNL operan en aguas europeas, dentro de los cuales la mitad operan en aguas del litoral noruego. En el continente norteamericano la representación es significativamente menor, siendo esta de alrededor del 13%, y aún menor en Asia, donde las cifras tan sólo alcanzan el 7%. Los restantes operan repartidos por todo el mundo, con presencia también en el continente australiano.

En lo referente a las aguas españolas, en nuestras costas podemos encontrar operando con frecuencia seis buques RoPax (Abel Matutes, Hypatia de Alejandría, Marie Curie, Nápoles, Bahama Mama y Sicilia), dos cruceros (Aida Nova y Costa Smeralda) y un remolcador (Ibaizabal Quince)

### 3.2.7 Refueling de GNL

Para que los buques dispongan del GNL en los puertos y puedan así hacer "bunkering" (término inglés que implica el repostaje de combustible), el GNL ha de recorrer un largo camino en términos de procesado del mismo.

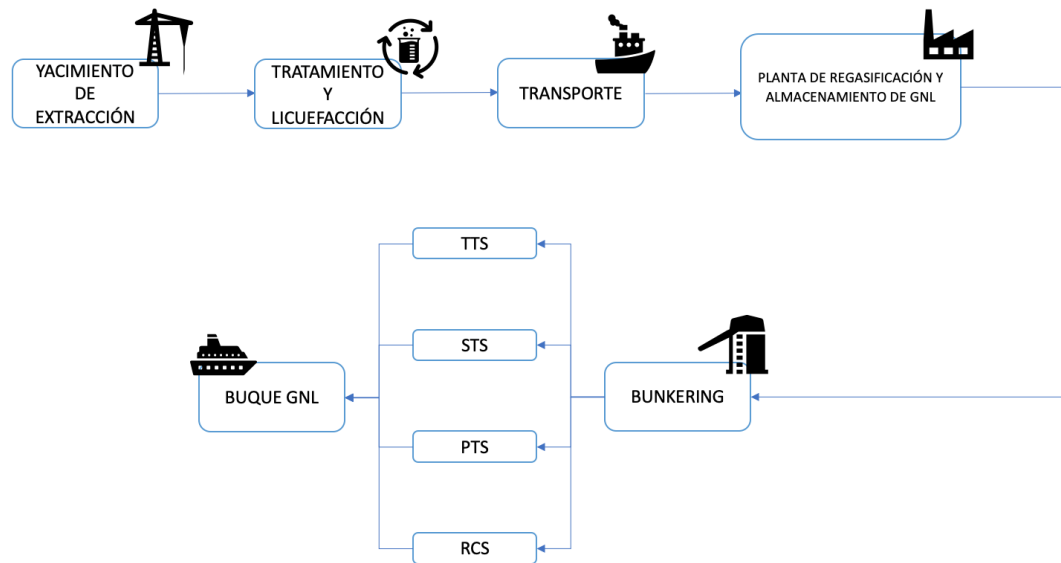


**Figura 3-52 Simplificación de la cadena logística del GNL (autoría propia)**

### 3.2.7.1 Tratamiento del gas natural

Desde la obtención del gas natural en los yacimientos petrolíferos hasta el suministro de GNL a los buques, el gas atraviesa tres fases.

#### 3.2.7.1.1 Licuefacción.

El gas natural procedente de los yacimientos contiene muchas impurezas, lo que hace necesario un pretratamiento del mismo para evitar así la presencia de partículas y elementos no deseados en nuestro combustible ya en estado líquido. Durante esta fase, se procede en primer lugar a la retirada del CO<sub>2</sub>, cuya presencia entraña riesgos de solidificación al reducir la temperatura hasta -161°C. A continuación, el gas es deshidratado para eliminar la humedad y después se eliminan tanto las trazas de mercurio como las PM presentes mediante una etapa de filtrado. Tras esto se da paso a la etapa de enfriamiento del gas hasta obtener el GNL y ser conducido este a los tanques de almacenamiento.

#### 3.2.7.1.2 Transporte.

Obtenido el GNL, el siguiente paso es acercarlo a los consumidores, por lo que el combustible es transportado hasta las plantas regasificadoras. Para ello se emplean buques gaseros, que tienen capacidades de almacenamiento de hasta 266.000 metros cúbicos de combustible.

#### 3.2.7.1.3 Regasificación.

Una vez almacenado el GNL en estas plantas, para el empleo como combustible marino no se vuelve a convertir a su estado gaseoso, sino que será suministrado en su estado líquido directamente, pudiéndose realizar el “bunkering” de cuatro maneras diferentes. En el caso de que se desee distribuir gas natural como fuente energética a industrias o consumidores, el GNL se verá sometido a un proceso de regasificación, en el que mediante vaporizadores se consigue introducir en la instalación de distribución el gas natural a una determinada presión, apta para un transporte seguro y eficiente hasta el consumidor final. [54]

### 3.2.7.2 Bunkering

El suministro de combustible final a los distintos buques puede realizarse de cuatro formas distintas, dependiendo en primer lugar, del tipo de instalación GNL del propio buque, y, en segundo lugar, de las instalaciones disponibles en puerto.

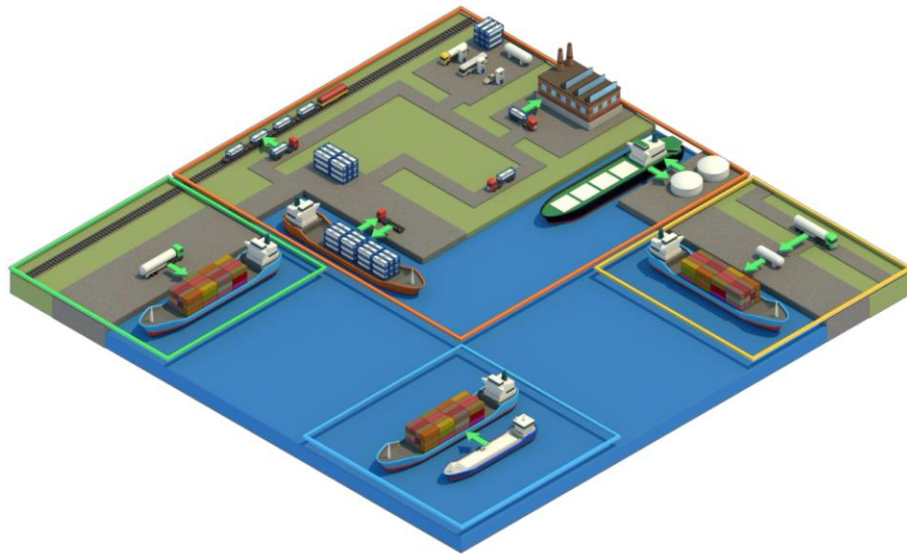


**Figura 3-53 Representación de las métodos actuales de realizar el "bunkering" [55]**

#### **3.2.7.2.1 Bunkering TTS (Truck To Ship)**

Este método de repostaje consiste en el empleo de un camión cisterna equipado para el manejo de GNL para suministrar combustible a un buque amarrado en puerto (recuadrado en verde en la imagen superior). Aunque la capacidad de los camiones cisterna es limitada, este método es una solución flexible para llevar a cabo el "bunkering" y por ello es uno de los más empleados en la actualidad.

Se trata de un proceso lento, pero que, de necesitar mayor velocidad y mayor cantidad de combustible, puede proporcionar el GNL desde varios camiones al mismo tiempo, en lo que se conoce como Multiple Truck To Ship (MTTS).

#### **3.2.7.2.2 Bunkering STS (Ship To Ship)**

Esta modalidad de "bunkering" consiste en el suministro del combustible a través de otros buques gaseros, a los que se abarloan para comenzar el traspaso de GNL (recuadrado en azul en la imagen superior). En este caso, se puede realizar haciendo uso de gabarras (menor capacidad) o buques de mayor entidad (diseñados específicamente para este propósito).

Aunque menos extendido, lo podemos encontrar en los puertos internacionales principales donde hay una mayor afluencia de buques con demanda GNL, lo cual permite amortizar el costo de dicha embarcación proveedora.

#### **3.2.7.2.3 Bunkering PTS (Pipeline To Ship)**

Este tercer método proporciona el GNL desde una terminal de almacenamiento en tierra directamente al buque a través de un sistema de tuberías acondicionadas para el refueling (recuadrado en naranja en la imagen superior). Dichos tanques de almacenamiento deberán ser abastecidos a su vez por camiones cisterna o buques gaseros.

Esta opción de una instalación fija es menos usual, pues aumenta la complejidad de la cadena de distribución de este combustible e incrementa el coste de las instalaciones y gestión. Son más viables económicamente en el caso de existir una estación de regasificación de pequeña escala en sus proximidades.

#### **3.2.7.2.4 Bunkering RCS (Removable Container To Ship)**

Esta última modalidad de llevar a cabo el suministro de GNL consiste en la carga y descarga de los propios tanques de almacenamiento del buque (recuadrado en amarillo en la imagen superior). Para

este sistema es necesario la existencia de grúas de carga en el propio muelle, así como una estación que permita rellenar los tanques descargados.

Se trata de un sistema poco común, puesto que aparte de añadir complejidad a la operación de "bunkering", implica disponer de tanques de almacenamiento duplicados, pues a la hora de hacer el refueling, se descargan los vacíos y se cargan unos llenos, para evitar así pérdidas de tiempo innecesarias a mayores.

### *3.2.7.3 Precauciones de seguridad*

Independientemente del método empleado para realizar la operación de "bunkering", todas conllevan un peligro inherente al estar tratando con GNL. Por ello se han de implementar medidas de seguridad muy estrictas para garantizar la seguridad del personal durante la operación.

Uno de los principales riesgos es el derrame de combustible (que está a temperaturas de -161 °C) tanto en cubierta como sobre el personal operando. Además, se ha de tener precaución a la hora del llenado de tanques, evitando sobrepresiones que pongan en peligro al personal y las instalaciones. Por ello es imprescindible el adiestramiento de la tripulación en estas operaciones, para lo que debe tener conocimientos del GNL y los riesgos que este entraña, y poder así evitar daños innecesarios.



## 4 APLICABILIDAD A LA ARMADA ESPAÑOLA

En este apartado del trabajo se va a proceder al estudio de la viabilidad de la aplicación del combustible GNL en los buques de la Armada Española. Para ello en primer lugar se dará a conocer el proceso de acondicionamiento que debe experimentar un buque para incorporar el GNL en su planta propulsora y se estudiará el desarrollo de la industria del GNL en España. A continuación, tras analizar el empleo de este combustible en las Marinas de Guerra del mundo, se procederá a conocer estado de los buques que componen la Flota actual y se analizará el devenir de la propulsión naval a nivel mundial. Conocidos ambos, y valorando las futuras necesidades de la Armada, se estudiará la posibilidad de incorporar la tecnología del GNL a bordo de las unidades.

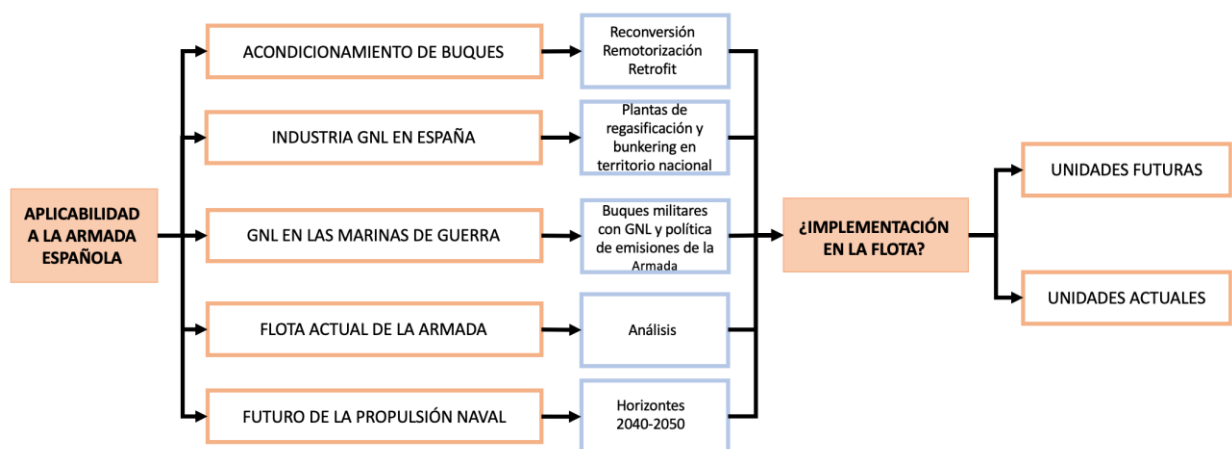


Figura 4-1 Mapa sinóptico del apartado (autoría propia)

### 4.1 Acondicionamiento de buques a propulsión a gas

El acondicionamiento de buques a propulsión a gas se puede abordar de dos maneras distintas. Por un lado, se puede realizar una "remotorización", que implica retirar los motores antiguos para introducir motores GNL completamente nuevos; y, por otro lado, se puede proceder a una reconversión del motor, en la que se adapta el motor diésel para poder hacer uso de ambos GNL y diésel.

Ambas opciones conllevan además la modernización de la planta propulsora y el buque en sí mismo, lo que en inglés se conoce como "retrofit", ya que implica la incorporación de nuevos elementos que afectan a la estructura, estabilidad y funcionamiento del buque. Entre estos, habría que tener en cuenta la instalación de los voluminosos tanques de almacenamiento del GNL, la unidad de vaporización de GNL, nuevos sistemas de control de la planta propulsora, nuevos sistemas de

seguridad ante fugas de gas e incendios, así como la red eléctrica y de tuberías necesarias para implementar los nuevos motores.

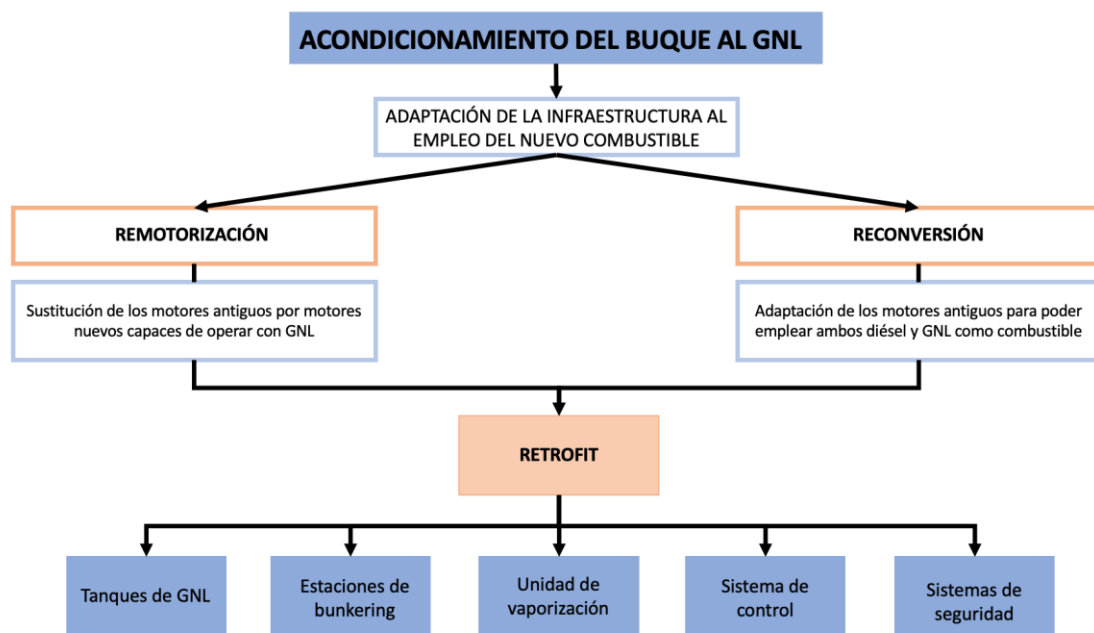


**Figura 4-2 Acondicionamiento del buque al GNL (autoría propia)**

A pesar de que la opción de la reconversión del motor es más llamativa económicamente, pues la inversión a realizar es menor, apostar por la remotorización es la alternativa por la que se decantan la mayoría de las navieras y armadores. Esto se debe a que la introducción de motores completamente nuevos aporta garantías de fiabilidad y seguridad de todos sus componentes, mientras que, en un motor reconvertido, parte del motor antiguo queda presente. Con esto se busca evitar posibles periodos de mantenimiento del buque que lo haga permanecer en puerto en reparación, lo que supone no tenerlo activo en el mercado y una pérdida importante de dinero. Por ello, y bajo un punto de vista empresarial, la tendencia en este caso es apostar por la opción de sustituir los motores al completo, con vistas a una economía de futuro y de recuperación a corto plazo de la inversión realizada.

Son muchos los aspectos que hay que tener en cuenta a la hora de planificar el acondicionamiento de un buque para introducir la instalación del GNL. En primer lugar, y teniendo en cuenta que la sala de máquinas permanece en el mismo emplazamiento a bordo (aunque en ella haya que realizar modificaciones), la tolerancia a la hora de ubicar los tanques de almacenamiento de GNL facilita en gran medida la instalación del sistema. Dado que estos son voluminosos, la solución adoptada más frecuente es la incorporación de los mismos en las cubiertas exteriores de la obra muerta, pues la normativa vigente lo permite.

Junto con los tanques se procede a la instalación de las estaciones de “bunkering”, debiendo tener en cuenta qué método se prevé aplicar para llevar a cabo estas operaciones (que serán explicadas en el apartado siguiente) y la duplicidad de las instalaciones (a ambas bandas del buque).

De la mano de los anteriores se procede a estudiar la localización de la unidad de vaporización del GNL, imprescindible para introducir el combustible en estado gaseoso a la presión óptima dentro del motor. Y como la lógica permite adelantar, es necesario el diseño de la instalación de tuberías conductoras del gas, que a mayores de ser tuberías reforzadas y de gran calidad, deben ir acompañadas de un sistema de ventilación a lo largo de todo su recorrido.

Por último, al tratarse de la introducción de un combustible gaseoso, son necesarias ciertas modificaciones en los sistemas de seguridad del buque. Por un lado, y para poder lograr una rápida

parada de emergencia cuando se esté navegando haciendo uso del GNL, es preciso incorporar válvulas de seguridad de doble cierre que aseguren la estanqueidad del circuito. Por otra parte, se han de realizar modificaciones en el sistema de contraincendios, incorporando sensores de detección de fugas de gas, así como de llama; junto el consiguiente sistema de extinción (fijo y portátil). [56]

Se trata de un proceso relativamente largo, cuya complejidad abarca desde un estudio técnico en profundidad, así como cálculos muy precisos para el diseño de la nueva planta propulsora, hasta la propia obra en el astillero, pues en muchos casos es necesario la realización de cesáreas al buque y la modificación de ciertas cubiertas y mamparos.

Muchos son los ejemplos de acondicionamiento de buques para transformarlos a propulsión dual y permitir el empleo del GNL, pues los buques de nueva construcción que directamente incorporan este tipo de propulsión son una minoría a día de hoy.

Dentro de las navieras decididas a apostar por la adaptación de los motores al GNL, cabe destacar la iniciativa de la naviera Baleària, que ha realizado cuantiosas inversiones tanto en buques de nueva construcción como en la adaptación de los ya operativos. Por un lado, son 200 millones de euros los invertidos en la construcción de tres nuevos ferris, el Hypatia de Alejandría y el Marie Curie, ya operativos; y el Eleonor Roosevelt, cuya entrada en servicio está prevista para el mes de marzo de este año 2021.

Por otra parte, la compañía Baleària recibió una subvención de la Comisión Europea por el valor de 11,7 millones de euros, a los que añadió 60 millones de euros más, para la adaptación de cinco de sus buques ya operativos. De entre estos el Abel Matutes, el Nápoles, el Bahama Mama y el Sicilia ya están operando con GNL, quedando pendiente la remotorización del ferry Martín i Soler, que empezó en noviembre de 2020. Además, para este 2021, la intención de la compañía es la remotorización de una unidad a mayores, el buque Heidy Lamarr. [57]

#### *4.1.1 Ejemplo de acondicionamiento del ferry Abel Matutes*

En el caso del ferry Abel Matutes este fue sometido a un proceso de remotorización y retrofit en 2019 con el objetivo de adaptar su planta propulsora al consumo de GNL como combustible. Para ello se sustituyeron sus dos motores principales por dos Caterpillar M 46 DF y junto con ellos, se introdujeron el resto de equipos auxiliares necesarios para operar con este combustible.

En la cubierta superior fueron instalados dos tanques de GNL de 178 m<sup>3</sup> junto con la unidad de control TCS (*cold box*) tal y como se puede apreciar en la Figura 4-3. Además, se adaptaron las estaciones para realizar bunkering por ambas bandas (babor y estribor) facilitando así las operaciones de llenado de tanques en puerto. Y, por último, fue necesario instalar los sistemas de seguridad inherentes a las instalaciones que operan con GNL tanto en la sala de máquinas como en las tuberías que componen el circuito de combustible.



**Figura 4-3 Ferry Abel Matutes [58]**

## 4.2 Estaciones de regasificación y "bunkering" en España

España es dominante en Europa en cuanto a instalaciones de regasificación, pues con seis actualmente operativas, es el país que posee mayor capacidad regasificadora, lo cual ha favorecido la integración y crecimiento de nuestro país en el mercado del GNL. Esto le convierte así en el país dominante en este sector en la Península Ibérica, pues Portugal cuenta con tan solo una estación de almacenamiento de GNL en la ciudad de Sines. A nivel europeo, siguiendo a España, se encuentran Francia y Reino Unido con cuatro y tres estaciones regasificadoras respectivamente.

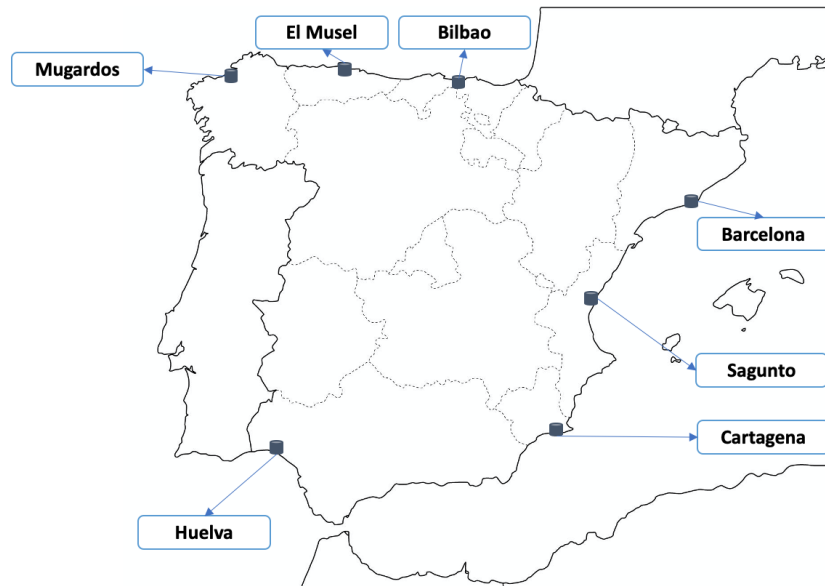


Figura 4-4 Estaciones de regasificación en España (autoría propia)

### 4.2.1 Estaciones de regasificación

Actualmente son siete las estaciones de regasificación en activo en España, lo que convierte a nuestro país en el mayor importador de GNL en Europa. Además de estas siete, que serán introducidas a continuación, existen dos proyectos para la construcción de dos estaciones más, una en Tenerife y otra en Gran Canaria.

#### 4.2.1.1 Planta de regasificación de Barcelona

Construida en 1969 y operada por Enagás S.A, esta planta cuenta con 6 tanques de GNL que permiten el almacenamiento de hasta 760.000 m<sup>3</sup> de GNL convirtiéndola en la más grande en territorio nacional. Con capacidad de recibir buques gaseros de hasta 266.000 m<sup>3</sup>, esta estación puede cargar buques a un ratio de 4200 m<sup>3</sup>/h y hasta 50 camiones cisterna cada día.



Figura 4-5 Planta de regasificación de Barcelona [59]

#### *4.2.1.2 Planta de regasificación de Huelva*

Activa desde 1988 y operada por Enagás S.A, la planta de Huelva, situada entre las desembocadura de los río Tinto y Odiel, cuenta con 5 tanques para almacenar el GNL, con una capacidad total de 619500 m<sup>3</sup>. Estas instalaciones pueden recibir buques gaseros de hasta 180.000 m<sup>3</sup> y proporcionan servicio de carga de buques a una velocidad de 3700 m<sup>3</sup>/h, así como de carga de camiones cisterna, permitiendo suministrar combustible a 50 de estos al día.



**Figura 4-6 Planta de regasificación de Huelva [59]**

#### *4.2.1.3 Planta de regasificación de Cartagena*

En servicio desde 1989 y operada por Enagás S.A, la planta consta de 5 tanques que le confieren una capacidad de almacenamiento de hasta 587.000 m<sup>3</sup> de GNL, lo que la convierte en la tercera planta más grande de España. Dispone de los medios necesarios para descargar buques gaseros de hasta 266.000 m<sup>3</sup> y ofrece servicios de carga de buques con un ratio de 7222 m<sup>3</sup>/h y de carga de hasta 50 camiones cisterna diariamente.



**Figura 4-7 Planta de regasificación de Cartagena [59]**

#### *4.2.1.4 Planta de regasificación de El Musel, Gijón*

Construida en 2012 por Enagás S.A, permanece inactiva desde entonces. Esta planta está diseñada para almacenar 300.000 m<sup>3</sup> de GNL en dos tanques y podrá recibir buques gaseros de hasta 266.000m<sup>3</sup>. En un principio fue diseñada para ofrecer servicio de carga de buques a un ratio de 6000 m<sup>3</sup>/h y poder cargar hasta 30 camiones cisterna cada día.



**Figura 4-8 Planta de regasificación de El Musel [59]**

#### *4.2.1.5 Planta de regasificación de Bilbao*

Activa desde 2003, y explotada al 50% entre Enagás S.A y Bahía de Bizkaia Gas, esta planta cuenta con 3 tanques con capacidad de 150.000 m<sup>3</sup> cada uno. Puede recibir buques gaseros de hasta 266.000 m<sup>3</sup> y proporciona servicios de carga de buques a una velocidad de 3000 m<sup>3</sup>/h y de carga de 15 camiones cisterna diariamente.



**Figura 4-9 Planta de regasificación de Bilbao [59]**

#### *4.2.1.6 Planta de regasificación de Sagunto*

En servicio desde 2006, pertenece al 72,5 % a Enagás S.A y el 27,5% a Saggas. Su capacidad de almacenamiento asciende hasta los 600.000 m<sup>3</sup> repartidos en 4 tanques. Puede recibir buques gaseros de hasta 266.000 m<sup>3</sup> y ofrece servicios de carga de buques a un ratio de 3000 m<sup>3</sup>/h y carga de 40 camiones cisterna al día.



**Figura 4-10 Planta de regasificación de Sagunto [59]**

#### 4.2.1.7 Planta de regasificación de Mugardos, El Ferrol

Bajo la explotación de Reganosa, se trata de la estación más moderna, pues está activa desde 2007. Cuenta con dos tanques de 150.000 m<sup>3</sup> cada uno y tiene capacidad para recibir buques gaseros de hasta 266.000 m<sup>3</sup>. También cuenta con instalaciones para la carga de buques, así como para la carga de camiones cisterna.

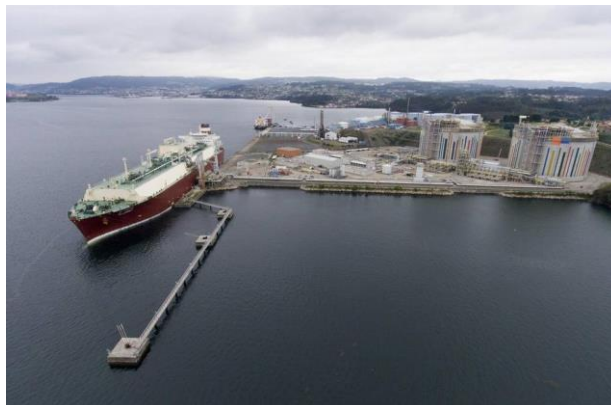


Figura 4-11 Planta de regasificación de Mugardos [60]

#### 4.2.2 Operaciones de "bunkering" en España en 2020

Cerrado el ejercicio del año 2020, se observa que las operaciones de "bunkering" realizadas en territorio nacional se han multiplicado casi por cuatro con respecto al 2019. Este aumento se ve reflejado, pero en menor medida, en la cantidad total de GNL suministrado, donde las cifras de este último ejercicio ascienden hasta 122.058m<sup>3</sup>, siendo estas alrededor de 1,5 veces superior del total del 2019. A pesar de la crisis económica provocada por la Covid-19, el sector del GNL ha seguido creciendo, presentando datos muy positivos.

Las operaciones de "bunkering" se llevaron a cabo en nueve puertos de las costas españolas y los principales métodos empleados para el refueling fueron MTTS, TTS y STS, quedando distribuidas dichas operaciones de la siguiente manera:

|                  | MTTS (m <sup>3</sup> -Nº ops) | TTS (m <sup>3</sup> -Nº ops) | STS (m <sup>3</sup> -Nº ops) | Tipo de barco    |
|------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|
| <b>Barcelona</b> | 24554-8                       | 212-5                        | 13550-6                      | Cruceros y Ro-Ro |
| <b>Valencia</b>  | 25089-254                     | 1688-38                      | -                            | Ro-Pax           |
| <b>Tenerife</b>  | -                             | -                            | 24385-11                     | Ro-Pax           |
| <b>Huelva</b>    | 168-1                         | 21474-104                    | -                            | Ro-Pax           |
| <b>Málaga</b>    | 4326-40                       | 1554-22                      | -                            | Ro-Pax           |
| <b>Denia</b>     | 4032-35                       | 42-1                         | -                            | Ro-Pax           |
| <b>Algeciras</b> | -                             | 420-3                        | -                            | Ro-Pax           |
| <b>Almería</b>   | 252-3                         | 126-3                        | -                            | Ro-Pax           |
| <b>Bilbao</b>    | -                             | 186-8                        | -                            | Remolcador       |

Tabla 4-1 Bunkering por puertos en España en 2020 (autoría propia basado en [59])

Tal y como revelan los datos, los principales puertos españoles involucrados en el suministro del GNL fueron Barcelona, Valencia, Tenerife y Huelva, de los cuales cabe destacar a Barcelona y

Tenerife por haber sido los únicos en emplear el método STS. Es por datos prometedores como estos por los que se decide apostar por la construcción de dos estaciones de regasificación en las Islas Canarias.

Es preciso mencionar que estos valores no se han mantenido constantes durante todo el ejercicio del 2020, sino que más bien presentan una tendencia decreciente a partir del mes de marzo que se mantiene durante gran parte del año hasta alcanzar una estabilización a finales del mismo. Esto se explica por la etapa de confinamiento general en España fruto de la publicación del Real Decreto 463/2020, de 14 de marzo, *“por el que se declara el Estado de Alarma para la gestión de la crisis sanitaria ocasionada por el Covid-19”* [61]. Es en los meses de la época estival donde el sector parece recuperar su actividad, para volver a descender en los dos últimos meses del año.

### **4.3 Empleo del GNL en las Marinas de Guerra**

Actualmente los buques militares, al ser buques de Estado, quedan exentos del cumplimiento de la normativas medioambientales establecidas en el marco internacional por los medios reguladores competentes (OMI). Es por ello que únicamente proceden a acercarse al cumplimiento de las mismas de manera voluntaria y por compromiso propio de contribuir a un desarrollo sostenible y una atmósfera más limpia.

Debido a esto, las marinas de guerra de todo el mundo buscan una solución de compromiso entre dos factores clave a la hora de determinar qué planta de propulsión y qué combustible emplear en sus buques. En primer lugar, el factor económico, y en segundo, las capacidades operativas que aporte al barco. Aun así, y con la intención de lograr una imagen de responsabilidad medioambiental y compromiso con el mismo, buscan en la medida de lo posible el acercamiento a los convenios establecidos para el sector civil del mundo marino.

#### *4.3.1 Política de emisiones de la Armada Española*

La Armada Española, siguiendo las líneas establecidas por el Ministerio de Defensa, también apuesta por el desarrollo de iniciativas enfocadas a respetar el medioambiente, sin que esto afecte a la operatividad y rendimiento de sus unidades.

En palabras del Almirante Jefe del Estado Mayor de la Armada en 2007, Don Sebastián Zaragoza Soto: *“La Armada continuará impulsando medidas de protección ambiental en buques e instalaciones en tierra y mantendrá su política de minimizar el impacto sobre la vida marina y el medio ambiente durante la realización de actividades de preparación de la fuerza.”* [12]

Las unidades de la Armada por tanto se adhieren voluntariamente al cumplimiento del convenio MARPOL (3.2.2.1) en lo que a los Anexos I (hidrocarburos), IV (aguas sucias) y VI (contaminación atmosférica) se refiere, siendo de especial relevancia para este trabajo el último de los citados.

Para ello, desde el RTPN (Ramo Técnico de Plataformas Navales) de la JAL (Jefatura del Apoyo logístico de la Armada), se emiten una serie de certificados con validez ante las instituciones reguladoras internacionales, que justifican el cumplimiento con las normas establecidas en el citado Anexo VI para cada unidad. Entre estos se encuentran:

- Certificado IAPP (Certificado Internacional de la Armada Española de Prevención de la Contaminación Atmosférica - International Air Pollution Prevention), el cual autentifica que se cumple con lo establecido en las normas del Anexo VI emitido por el RTPN.
- Certificado EIAPP (Certificado Internacional de la Armada Española de Prevención de la Contaminación Atmosférica de los Motores- International Air Pollution Prevention for Engines), emitido por Navantia, que incluye junto con la ficha técnica de los motores, los valores de emisiones NOx.
- Certificado “Type Approval”, el cual ratifica que el incinerador instalado a bordo es conforme con la norma MEPC 76(40), que regula la eliminación de basuras y otros desechos.

El compromiso de la Armada va más allá de la emisión de estos certificados puntualmente, puesto requiere que sean renovados periódicamente, para lo que establece necesario la justificación y demostración de que los motores no han sufrido modificaciones y de que se ha ejecutado un plan de mantenimiento exhaustivo sobre los mismos. [62]

#### 4.3.2 Buques militares con GNL

A día de hoy son muy pocos los ejemplos que se pueden encontrar entre las Marinas de Guerra del mundo que se hayan decidido a apostar por el GNL como combustible para sus buques. La explicación a esto se encuentra en las altas exigencias en cuanto a diseño y capacidades a las que están sometidos los buques de guerra.

En lo referente al diseño, los buques de guerra son proyectados buscando el máximo aprovechamiento del espacio a bordo, pues son múltiples y muy variados los sistemas que se equipan a bordo para poder dotar así a la plataforma de las capacidades necesarias para desempeñar sus funciones en la mar con plenas garantías. Al quedar el espacio disponible tan reducido, el GNL como combustible parece no tener cabida, pues su instalación a bordo es muy voluminosa. En primer lugar, los tanques de combustible superan ampliamente en tamaño a los del combustible diésel; y, en segundo lugar, no solo es necesario introducir los tanques de combustible, sino que son necesarios otra serie de equipos como la unidad de vaporización y la unidad de control, las cuales también requieren un espacio a considerar.

Por otra parte, la presencia del GNL dentro de un buque de guerra entraña consigo muchos riesgos asociados a la alta presión a la que queda almacenado. En buques diseñados para operar en escenarios de alta tensión y confrontación, donde el establecimiento del combate naval es una posibilidad real, la presencia de GNL añade aún más peligros a bordo.

Sin embargo, países como Finlandia y Noruega, pioneros en el empleo del GNL como combustible, sí han optado por las plantas de propulsión duales para algunas de las unidades que componen lo que se podría denominar su cuerpo de Guardia Costera o Salvamento Marítimo. Por un lado, la "Norwegian Coast Guard- Kystvakten en noruego" cuenta con tres unidades de patrulla costera capaces de operar con diésel y GNL en sus motores. Estas unidades, que incorporaron motores duales de Wartsila desde la construcción de las mismas son: KV Barentshav, KV Bergen y KV Sortland.



**Figura 4-12 KV Barentshav (Guardia Costera de Noruega) [63]**

Por otro lado, la Guardia Fronteriza Finlandesa- *Rajavartiolaitos* en finés, también cuenta con un buque de patrulla de marítima que opera con motores duales de diésel y GNL. Se trata del patrullero Turva, que incorpora tres motores Wartsila 34 DF, tanto para propulsión como para generación de energía eléctrica.



**Figura 4-13 Buque Turva (Guardia Fronteriza Finlandesa) [64]**

Además, es preciso mencionar que, a parte de los ejemplos ya existentes, existen otras Marinas de Guerra interesadas en la propulsión con GNL para sus unidades. Entre estas destaca el proyecto de la *US Coast Guard*- Guardacostas de los Estados Unidos, que plantea la construcción de una nueva y moderna serie de patrulleros que contengan plantas de propulsión duales con diésel y GNL. Estas compondrían los patrulleros de la clase "Offshore Patrol Cutter 950" y supondrían el primer paso de la Marina de los Estado Unidos hacia la adopción del GNL como combustible y las tecnologías limpias.



**Figura 4-14 Offshore Patrol Cutter (US Coast Guard) [65]**

#### **4.4 Estado actual de los buques Armada Española**

Tal y como se muestra en el documento "Lista Oficial de Buques de la Armada" [66], firmado por el Almirante Jefe del Estado Mayor de la Armada en noviembre 2020, Don Teodoro Esteban López Calderón, a día de hoy la Armada cuenta con 93 buques en activo, además de las 45 unidades auxiliares, bajo dependencia de la Agencia Tributaria a través de Aduanas.

A modo de resumen, se pueden clasificar los buques de la Armada Española [67] en los siguientes grupos:

- Buque de proyección estratégica: 1
- Fragatas: 11 (5 clase "Álvaro de Bazán" y 6 clase "Santa María")
- Submarinos: 3
- Anfibios: 2
- Lanchas de desembarco: 12
- Aprovisionamiento de combate: 2
- Transporte ligero: 1
- Salvamento y rescate: 1
- Auxiliares: 3

- Remolcadores: 2
- Medidas contraminas: 6
- Buques de acción marítima: 12 (6 clase "Meteoro", 2 clase "Descubierta" y 4 clase "Serviola")
- Patrulleros: 11 (2 clase "Toralla", 3 clase "Chilreu", 3 clase "Anaga", 2 de vigilancia costera y 1 de vigilancia interior).
- Hidrográficos: 3 (2 clase "Malaspina" y 1 clase "Cástor")
- Investigación oceanográfica: 1
- Buques escuela: 2
- Veleros escuela: 9
- Lanchas de instrucción: 8
- Lanchas hidrográficas transportables: 3

De entre los buques de la Armada resalta que la vida media, tomando como inicio de esta la fecha de entrada en servicio y no la de botadura, es de 24 años. Teniendo en cuenta que la vida útil media de los buques se considera alrededor de los 30 años, la flota de la Armada se presenta envejecida.

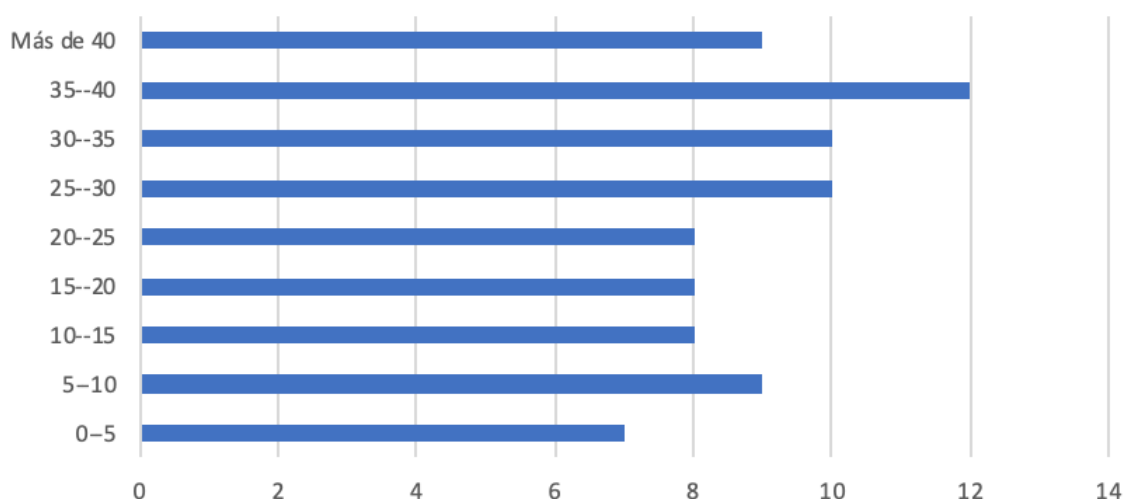


**Figura 4-15 Años de servicio de los buques de la Armada (autoría propia)**

En vista de los datos que refleja la gráfica superior, aproximadamente el 50% de los buques de la Armada supera ya los 25 años de servicio. Esto por un lado refuerza el hecho de que la flota está envejecida; pero por otro, ensalza el buen mantenimiento que se realiza en los astilleros a todas las unidades, permitiendo así alargar los años de vida de los mismos, manteniendo plenas capacidades.

Como plan de acción ante estos hechos, la Armada Española se encuentra sumida en estos momentos en varios proyectos para la renovación de parte de la flota actual. Por un lado, los submarinos clase "Isaac Peral" S-80 Plus, que sustituirán a los de la clase "Galerna" S70. Por otra parte, está en marcha ya el proyecto de las Fragatas de la clase "Almirante Bonifaz" F-110, para sustituir a las fragatas de la clase "Santa María" F-80. Además, ha sido aprobado ya la construcción del nuevo Buque de Acción Marítima de Intervención Subacuática (BAM-IS) que sustituirá al actual buque de salvamento y rescate Neptuno.

Sin embargo, no sólo se centra la Armada en sus buques, sino que también mantiene en el tintero otros proyectos vitales para poder mantener las capacidades operativas actuales. Entre ellos, la renovación de las aeronaves de ala fija, para lo que se plantea la compra de los nuevos F-35, que sustituirán a los Harrier. En lo referente a los helicópteros se tiene intención de abordar un proceso de modernización de los actuales SH60B para alargar su vida operativa. Por último, también se busca reemplazar los vehículos de asalto anfibio AAV y continuar con la renovación de vehículos pesados y VAMTAC de Infantería de Marina.

## 4.5 Futuro de la propulsión

El futuro de la propulsión naval es un tanto incierto, pues la situación mundial actual está entorpeciendo y mucho el desarrollo de muchas vías de investigación. El Covid-19 ha tenido un gran impacto en el sector marítimo, pues ha generado mucha incertidumbre en lo que a capacidad comercial y empleo de la energía se refiere, lo cual seguro tendrá repercusión en el futuro más próximo.

Sin embargo, son claros tanto los objetivos que se quieren lograr a nivel medioambiental, así como las líneas de investigación y desarrollo de nuevos combustibles no fósiles más respetuosos con el medioambiente. (Ver Figura 4-16 )

El primer objetivo que la comunidad internacional quiere abordar a medio y largo plazo es la descarbonización total del medioambiente, para lo que será necesario mantener una rigurosa política de emisiones, que en el sector marítimo afecta sobre todo a los combustibles empleados para la propulsión y a las propias plantas propulsoras. Todo ello buscando mantener siempre la eficiencia y la competitividad económica.

El 2050 es el año que se establece como techo para llevar a cabo la descarbonización, lo cual a priori, parece un objetivo un tanto ambicioso. En consecuencia, será necesaria la implantación de duras y restrictivas políticas que regularicen esta evolución, aunque el mercado de los combustibles y el precio que estos alcancen siempre será un factor fundamental y muy influyente en todo el proceso.

Para el horizonte del 2050 se espera que la tecnología de combustibles neutros en carbono ya se haya desarrollado hasta el punto de que sea una opción real y viable apostar por los mismos. Entre ellos, se han comenzado ya investigaciones que estudian el empleo de amoniaco o el metanol como combustibles para los motores marinos.

Al mismo tiempo, al igual que en estos momento el GNL está en auge y se espera que siga creciendo a lo largo de la próxima década; la descarbonización obligará también a su sustitución, pues a pesar de que reduce las emisiones de SOx al 100%, PM al 99% y NOx al 85%, las cantidades de CO<sub>2</sub> quedan reducidas tan solo un 30 %. Sin embargo, el GNL se mantendrá a la cabeza como combustible alternativo hasta bien entrada la década del 2040, que será cuando empiece a ser viable la entrada de los combustibles neutros en carbono. No obstante, no sufrirá una desaparición repentina, sino que también se plantea el empleo del GNL en combinación dual con los nuevos combustibles. [68]

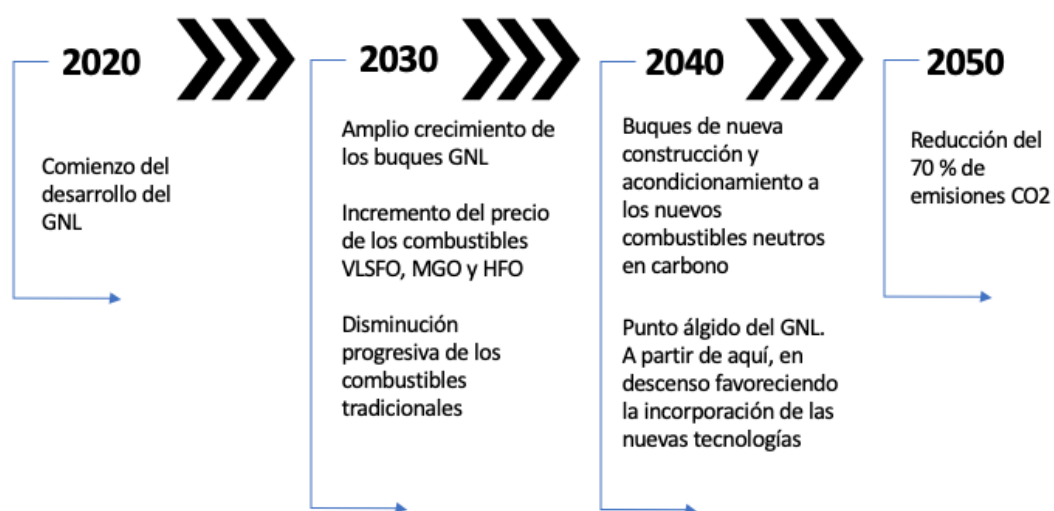


Figura 4-16 Línea temporal del desarrollo de combustibles (autoría propia)

Se espera que para el año 2035 el GNL ya supere al gasoil y diésel como combustible principal, aunque estos plazos se verán seguramente retrasados debido al impacto económico causado por los

efectos de la pandemia Covid-19. Además, el desarrollo de los combustibles neutros en carbono, acompañado de la expansión de su cadena logística y el establecimiento de normativas reguladoras medioambientales, permitirá que en el año 2050 los combustibles dominantes sean los neutros en carbono (60%) y el GNL (30%).

Es por ello, que el GNL no debe tomarse solo como un alternativa puntual, sino como el combustible idóneo para llevar a cabo este proceso de transición a los combustibles más limpios y respetuosos con el medioambiente.

Entre las alternativas que se presentan en el empleo del GNL, los motores duales son la opción que más garantías ofrece. En primer lugar, el mero hecho de emplear GNL supone un ahorro económico en combustible. Por otra parte, el margen de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> hace que pueda adaptarse a las restricciones que paulatinamente se vayan implementando hasta lograr la descarbonización. Y, por último, los motores duales abren la posibilidad de que, una vez desarrollados los combustibles neutros en carbono, la adaptación de los buques para su empleo sea más sencilla y menos costosa.

#### 4.6 Implementación en la Armada ¿Sí o no?

En este apartado se pretende analizar la posibilidad de implantar la propulsión a GNL en los buques de la Armada, tanto entre los actuales mediante un proceso de acondicionamiento, como en futuras unidades de la Flota. Para abordar este tema se seguirá la siguiente estructura:

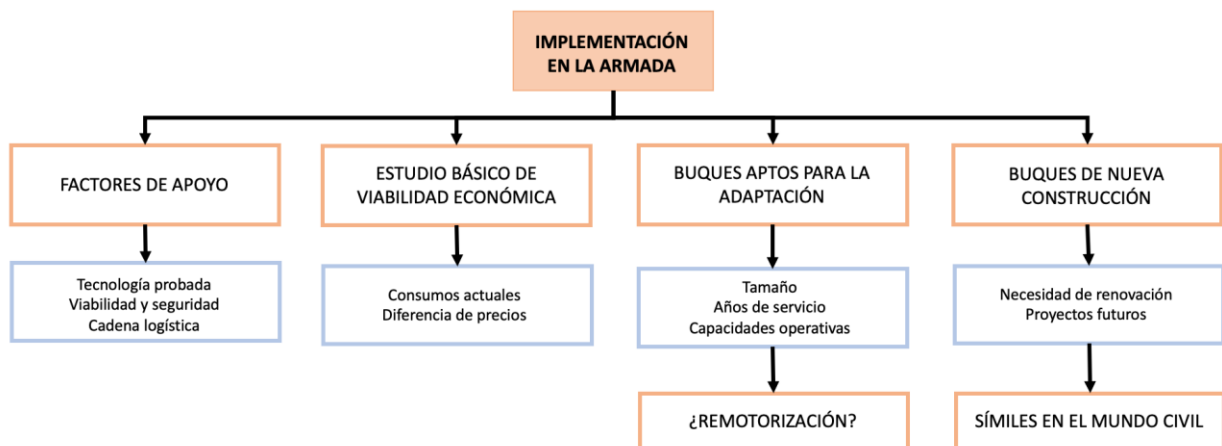


Figura 4-17 Mapa sinóptico del apartado (autoría propia)

##### 4.6.1 Factores de apoyo a la apuesta por el GNL

Para justificar la apuesta de la Armada por el GNL es preciso tener en cuenta en primer lugar una serie de factores que refuerzan la viabilidad de este combustible a bordo de los buques. La tecnología que acompaña al GNL ha sido demostrada y probada, lo cual la convierte en una apuesta segura desde el punto de vista de la fiabilidad que aportan en las plantas propulsoras. Además, los buques de nueva construcción con GNL, así como los muchos procesos de remotorización que se han llevado a cabo y continúan haciéndose denotan que son proyectos viables desde el punto de vista técnico y tecnológico.

Pese a que en principio se tenga la idea de que el almacenamiento a bordo de GNL a elevada presión pone en riesgo la seguridad del mismo, se han desarrollado mecanismos y sistemas que mitigan los potenciales riesgos que la presencia de gas a elevada presión conlleva. Para ello, las instalaciones del GNL quedan aseguradas por doble barrera, que proporcionan protección frente a fugas. Al mismo tiempo se instalan sistemas de detección de fugas y respuesta automática ante las mismas, posibilitando el aislamiento automático que reduzca las consecuencias derivadas de una fuga.

Por otra parte, juega en favor de la tecnología del GNL el hecho de que la cadena logística en Europa, y aún más España, esté ampliamente desarrollada y con perspectivas de seguir creciendo.

Como principal país europeo en estaciones de regasificación, y con la estructura de “bunkering” actual en España, el abastecimiento de combustible a las unidades no supone un inconveniente.

Además, como ya se ha mencionado anteriormente, otro punto fuerte del GNL es la amplia mejora en lo referente a las emisiones atmosféricas, lo cual permitiría a la Armada mejorar su imagen como Institución, ya que demostraría que, apuesta por las tecnologías más limpias, elevando a mayores su compromiso con el medioambiente y el desarrollo sostenible. Además, supondría un ejemplo para otras Marinas de Guerra, que en una situación similar que la Armada Española, se encuentren en proceso de decisión acerca de la propulsión en sus unidades futuras.

#### 4.6.2 Estudio básico de viabilidad económica

La economía que rodea a la tecnología del GNL es otro factor a tener en cuenta, pues ha adquirido tal importancia que supone un elemento decisivo a la hora de decidirse por la incorporación de este combustible en los buques.

Tomando como ejemplo los casos de remotorización llevados a cabo en buques civiles, la inversión media por cada buque que es sometido a una transformación de este calibre ronda entre 10 y 15 millones de euros. Lo que puede parecer en primer lugar una gran inversión sin rentabilidad alguna, puede terminar suponiendo un ahorro a medio y largo plazo. Esto es posible debido a la diferencia de precios entre el combustible empleado actualmente (DFM-F76) y el del GNL.

Quedando el precio actual del DFM-F76 en 520 €/tonelada (último precio pagado por la Armada por este combustible en 2021) y el del GNL en 360 €/tonelada, la diferencia actual es de 160 € por tonelada de combustible. Pese a que ambos combustibles dependen del valor de los mercados internacionales, y que estos fluctúan diariamente, el margen existente entre ambos precios se prevé que siga aumentando. Esto es así ya que el precio del diésel está incrementando paulatinamente, recuperando su valor previo al impacto de la Covid-19, que lo hizo alcanzar mínimos históricos.

Además, es preciso tener en cuenta el gasto anual de la Armada Española en combustible, cuya evolución queda reflejada en la siguiente tabla, la cual recoge los datos de los últimos 5 años.

| HISTÓRICO CONSUMOS (5 AÑOS)            | 2017 |                | 2018 |                | 2019 |                | 2020 |                | 2021 |                |
|----------------------------------------|------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|----------------|------|----------------|
|                                        | M€   | m <sup>3</sup> | M€   | m <sup>3</sup> | M€   | m <sup>3</sup> | M€   | m <sup>3</sup> | M€   | m <sup>3</sup> |
| CONSUMO                                | 38,6 | 64614          | 47,2 | 77595          | 59   | 95425          | 24,4 | 49285          | 34,1 | 65000          |
| PRECIO MEDIO ANUAL (€/m <sup>3</sup> ) | 597  |                | 608  |                | 618  |                | 500  |                | 520  |                |

Figura 4-18 Consumo de DFM-F76 en la Armada Española (autoría propia basado en [69])

Teniendo en cuenta que el valor de mercado de los combustibles varía diariamente, la tabla recoge el precio medio anual que finalmente la Armada paga a sus distintos proveedores. Con todo ello, y considerando el gasto total en combustible cada año, el margen entre los precios de GNL y DFM-F76 es lo suficientemente amplio como para pensar en que la inversión en GNL es favorable desde el punto de vista económico, pensando en un plano económico a medio y largo plazo.

#### 4.6.3 Adaptación de buques actuales de la Armada

No obstante, los buques de la Armada son muy distintos unos de otros, pasando de la más pura tradición marinera en las cubiertas del Buque Escuela Juan Sebastián Elcano, a las más novedosa tecnología aplicada en el BAM Furor (P-46). Es por ello, que de entre los 93 buques que componen la actual flota de la Armada, el GNL solo podría plantearse para algunos de ellos.

Por un lado, como es obvio, hay que descartar en primer lugar a los buques veleros, así como a aquellos de pequeña envergadura, como LCM's, lanchas de instrucción o lanchas hidrográficas transportables. Además, tampoco se consideran aptos para llevar a cabo un proceso de adaptación al GNL aquellos cuya vida de servicio sea superior a los 25 años, pues considerando que la vida media

está alrededor de los 30 o 35 años, no sería viable desde el punto de vista económico y muy complicado desde el punto de vista técnico.

Por tanto, se podría entrar a valorar abordar este proceso únicamente para las unidades que a continuación se mencionan: el JCI, la serie de las F100, los buques de Asalto Anfibio, el buque de Aprovisionamiento Cantabria, la serie de los buques de medidas contraminas, los BAM de la clase Meteoro, los patrulleros clase Chilreu (Alborán, Arnomendi y Tarifa) y el buque escuela Intermares.

De entre estos, el mero hecho de estar concebidos para realizar sus funciones en escenarios de alta tensión, pudiendo estos llegar a ser bélicos, hace que el GNL como combustible quede descartado para las fragatas, los buques anfibios, el JCI, los BAM, el buque de aprovisionamiento y los buques MCM, pues su instalación a bordo alteraría las capacidades operativas de los mismos. No ocurre de la misma manera con los patrulleros y el buque escuela Intermares, pues dado que estos desempeñan funciones de vigilancia, inspección pesquera, búsqueda y salvamento, así como presencia naval y control del espacio marítimo, el GNL no supone mayores riesgos que dificulten el desempeño de su actividad.

A pesar de ser candidatos posibles a la instalación del GNL, es necesario estudiar el coste económico que supone abordar un proceso de remotorización, así como la viabilidad técnica en términos de espacio a bordo. Aunque como se mencionó anteriormente el precio de este tipo de operaciones en el mundo civil suele rondar los 15 millones de euros, esta inversión será de mayor entidad en buques militares, pues el espacio limitado, así como la compacta distribución de los múltiples sistemas que incorporan los buques de guerra, hacen que la complejidad de esta operación se dispare, y con ello, su coste.

Es por ello que, dada la situación económica actual, agravada por la crisis ocasionada por la Covid-19, los procesos de remotorización se presentan inviables para la Flota actual de Armada, no solo desde la perspectiva técnica, que muestra que en muchas de las unidades propuestas anteriormente no sería factible la instalación del GNL; sino también desde el plano económico, ya que requiere grandes inversiones que podrían no llegar a recuperarse a lo largo de la vida operativa restante de los buques.

#### *4.6.4 Buques de nueva construcción*

Sin embargo, el hecho de que la remotorización de los buques actuales no sea una operación viable, no implica que el GNL no pueda estar presente en las futuras unidades de la Armada. Con una Flota envejecida como se demostró anteriormente, es preciso comenzar a pensar en relevos naturales de los buques ya existentes para evitar la pérdida de las capacidades que los buques actuales aportan, pudiendo formar parte el GNL de las nuevas plantas propulsoras desde el comienzo de la construcción de los buques, lo cual abarataría su coste.

Es por ello que a la hora de pensar en renovación de unidades haya que entender primero las necesidades a medio y largo plazo de la Armada. Atendiendo a los cometidos operativos que realizan y a que se trata de buques cuya vida de servicio supera los 30 años, surge la necesidad de renovar los buques hidrográficos Malaspina (46), Tofiño (46), Antares (47) y Hespérides (30), así como los buques auxiliares Mar Caribe (33) y Las Palmas (40), el buque de transporte ligero Contra maestre Casado (39) y los remolcadores Mahón (40) y La Graña (34).

Se trata de buques que realizan misiones de presencia naval, apoyo a autoridades y unidades, seguridad marítima y conocimiento del entorno marítimo entre otras, que se encuentran en la etapa final de sus vidas de servicio, y que, por tanto, hacen necesaria la llegada de nuevas y más modernas unidades que no solo los sustituyan, sino que también mejoren los sistemas y capacidades que actualmente poseen.

Buscando dotar a las nuevas unidades de plantas propulsoras que empleen energías más limpias, la tecnología del GNL se presenta como posible candidata a formar parte de las mismas. En el caso de los buques destinados a sustituir los mencionados anteriormente, la presencia del GNL no añade ningún

impedimento ni supone limitación alguna a las capacidades operativas de los mismos, lo cual hace que su instalación a bordo sea viable. Tanto es así, que en el mundo civil existen buques de similares características que demuestran la viabilidad de estos proyectos.

En el caso de los buques remolcadores Mahón y La Graña, se puede tomar como referencia el modelo de la naviera española Ibaizabal, con su remolcador “Ibaizabal Quince”, el cual conllevó una inversión de 12,5 millones de euros. Construido en los astilleros de Murueta (Bilbao), este remolcador incorpora en su planta propulsora dos motores duales de la compañía Wartsila que permiten el empleo tanto de diésel como GNL como combustibles.



**Figura 4-19 Ibaizabal Quince [40]**

De este modo, el Grupo Ibaizabal da entrada a la propulsión con GNL en este tipo de embarcaciones, suponiendo una referencia a nivel nacional e internacional, cumpliendo al mismo tiempo con el objetivo de la naviera de apostar por la sostenibilidad y respeto al medioambiente.

En el caso del buque de transporte ligero Contramaestre Casado, al igual que sucedió tras la baja de los buques del Ejército de Tierra El Camino Español y Martín Posadillo, se podría considerar la construcción de una nueva serie de buques dedicados al transporte logístico, que incorporen el GNL en sus plantas propulsoras. Con un diseño no muy desencaminado de los buques TLET (Transporte Logístico Ecológico y Trivalente), presentados en 2018 por Navantia para sustituir a los dos buques del Ejército de Tierra y que ya fueron diseñados para operar con el GNL como combustible, los nuevos buques de transporte podrían suponer un paso firme en la apuesta por las tecnologías limpias para la propulsión naval a nivel militar.



**Figura 4-20 Proyecto de los buques TLET de Navantia [70]**

De modo similar, pero adaptando el proyecto a buques de menor envergadura, se podría considerar la construcción de los relevos de los buques auxiliares Mar Caribe y Las Palmas. Se trata de buques de gran versatilidad cuyas funciones abarcan desde operaciones de patrulla marítima, salvamento y

rescate y de remolcado, hasta operaciones de transporte logístico a pequeña escala y de apoyo a buceadores. Es por ello que los sustitutos de estos deberán ser buques con gran capacidad de adaptación a la participación en misiones de muy variado propósito, sin que esto impida que se opte por una planta propulsora que pueda incorporar el GNL y haga de estos unos buques más respetuosos con el medioambiente.

Por último, se plantea también la necesidad de renovar la flota de buques hidrográficos, pues tanto Malaspina como Tofiño y Antares superan los tres los 45 años de servicio. Al mismo tiempo, tampoco se descarta el proyecto de sustitución del Hespérides, pues a día de hoy, y con 30 años de servicio, es el único buque de investigación oceanográfica con el que cuenta la Armada. La implantación de la tecnología del GNL en buques de estas características (aunque en el mundo civil) ya ha sido probada, pues la Agencia Federal Marítima e Hidrográfica (BSH) alemana puso a flote en 2020 el primer buque hidrográfico del mundo propulsado con GNL.



**Figura 4-21 Buque hidrográfico Atair (Alemania) [71]**

Se trata del buque hidrográfico Atair, cuya construcción en los astilleros de Fassmer (Kiel, Alemania) conllevó una inversión de 114 millones de euros y supuso un gran reto tecnológico que, tras 16 meses de trabajos, ha dado como resultado un buque a la cabeza de la innovación en propulsión con GNL. Siguiendo el ejemplo del gobierno alemán, la apuesta por el GNL en la flota de buques hidrográficos para la Armada Española podría suponer abrir las puertas a las tecnologías más respetuosas con el medioambiente en nuestra Flota.

En vista de lo expuesto en este apartado, el factor técnico que acompaña la incorporación del GNL en las plantas propulsoras de los distintos tipos de buques, no supone una barrera que impida decantarse por esta nueva tecnología. El hecho de que existan proyectos civiles en buques de similares características a los que se pretende renovar, aporta ciertas garantías en cuanto a la viabilidad de los proyectos. Además, la iniciativa mostrada por Navantia de llevar a cabo proyectos de este tipo, refuerza la idea de apostar por la construcción de innovadores buques en astilleros nacionales.

Sin embargo, es el factor económico el que se presenta más determinante a la hora de llevar a cabo un proyecto de renovación de la flota, incluya este o no la propulsión a GNL. Dada la situación económica actual que atraviesa España, los proyectos de buques de nueva construcción suponen grandes inversiones que deben ser estudiadas muy cuidadosamente. Estos proyectos los lleva a cabo el Ministerio de Defensa a través de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM), que se encarga a su vez de encontrar el modo de hacer viable la financiación económica para estos proyectos.

Pero la DGAM no atiende solo las peticiones de la Armada, sino también al Ejército de Tierra y al Ejército del Aire. Es por ello que, en vista de los recursos limitados de los que se disponen, se deba establecer un orden de acometida de proyectos en función de las necesidades operativas que tenga cada ejército.

En el caso de la renovación de los buques que se plantean anteriormente, una posible vía que facilitaría la obtención de los fondos necesarios sería a través de la cofinanciación de los proyectos con la Unión Europea en mayor o menor medida. En lo que a los nuevos buques hidrográficos y

oceanográfico respecta, dado el importante rol que desempeñan de cara a la seguridad marítima y a la investigación científica, otros países como Italia ya han logrado obtener fondos europeos para la renovación de su flota de buques hidrográficos. Por otra parte, proyectos que apostaron por el desarrollo de las tecnologías limpias, como el del remolcador “Ibaizabal Quince”, han sido cofinanciados por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER).

Además, la Unión Europea ha creado recientemente iniciativas como el “*Next Generation EU*” Plan de Recuperación de la UE “ que busca impulsar la recuperación social, económica e industrial con el objetivo de lograr una Europa más resiliente, enfocada en la digitalización y en la consecución de una Europa más respetuosa con el medioambiente. De este modo, se abre una posible vía de financiación para los nuevos proyectos de renovación de los buques de la Armada, la cual podría suponer una importante liberación de carga sobre los presupuestos de Defensa.

Y es dentro de estos proyectos de la Armada Española, donde se propone que se establezca la propulsión con GNL como uno de los requisitos para los buques de nueva construcción, incluyendo de este modo, dentro de las necesidades operativas de la Armada, la apuesta por tecnologías más limpias en la propulsión de sus buques.

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este apartado se exponen las ideas principales que se desprenden del desarrollo de este trabajo, analizando al mismo tiempo la consecución de los objetivos (1.2) establecidos al comienzo del mismo. Además, se establecen las posibles vías de desarrollo que permitan continuar con la línea de trabajo de este proyecto y profundicen en su línea de investigación.

### 5.1 Conclusiones y cumplimiento de objetivos

De entre las muchas conclusiones que se pueden extraer de la realización de este proyecto, la conclusión principal es que España y la Armada tienen ante sí la oportunidad de ser de nuevo un referente a nivel mundial con su apuesta por el GNL en los nuevos buques de la Flota.

En lo referente a los objetivos planteados en la introducción de este proyecto, se considera que todos ellos han sido alcanzados a lo largo del desarrollo del trabajo. En primer lugar, se ha dado a conocer el estado actual de las turbinas de gas en la propulsión naval y se ha profundizado en el funcionamiento de la turbina LM2500, pues este es el modelo que se ha implantado en las unidades de la Armada Española. De este análisis se concluye que, dadas las ventajas y capacidades que aportan las turbinas de gas a los buques, la incorporación de turbinas de gas en las plantas propulsoras de las nuevas F-110 es un completo acierto.

En segundo lugar, la profundización en el funcionamiento y desarrollo de la tecnología del GNL como combustible naval a nivel mundial, refuerza la idea de que potenciar el empleo del GNL implica hacer una apuesta de presente y de futuro, de compromiso con el medioambiente, con el desarrollo sostenible y con la sociedad. No solo se trata del combustible idóneo para llevar a cabo la transición hacia la descarbonización de la atmósfera, sino que, además, a día de hoy, tanto la tecnología como la infraestructura que lo soportan, hacen del GNL una alternativa fiable y en auge. Prueba de ello es el gran impulso que el sector marino civil está liderando, donde cada día son más navieras las que se decantan por la instalación del GNL en sus buques. Del mismo modo, y aunque en muy menor medida, dentro del mundo militar, países como Finlandia y Noruega han incluido de manera satisfactoria el GNL en las plantas propulsoras de unidades de nueva construcción.

Asimismo, el hecho de que España sea líder en el sector de la regasificación y en instalaciones de almacenamiento, denota que, en nuestro país, además de estar en crecimiento y expansión, la industria del GNL está bien desarrollada; y, por tanto, la cadena logística de este combustible queda asegurada a nivel nacional.

En este sentido, la decisión de apostar por el GNL en los nuevos buques de la Flota se ve claramente respaldada por las facilidades que se presentan en nuestro país. Siendo el combustible apropiado para liderar la descarbonización en el sector naval, la Armada Española, a colación de su

política de compromiso medioambiental, puede reforzar su buena imagen en el ámbito militar internacional de compromiso con las tecnologías limpias y la innovación tecnológica.

Es por ello que la incorporación del GNL en plantas propulsoras duales (diésel-GNL) de buques como remolcadores, buques de transporte ligero y auxiliares y buques hidrográficos, es una opción viable y eficiente. Al tratarse de buques que principalmente navegan en aguas nacionales y desempeñan funciones de presencia naval, apoyo logístico a otras unidades y autoridades y conocimiento del entorno marítimo, el empleo del GNL no limita sus capacidades. Por otra parte, la propulsión dual aporta flexibilidad y autonomía a los buques que la incorporan, pues pueden consumir distintos combustibles dependiendo de los tránsitos que realicen. Navegando en zonas protegidas (ECA's) y donde el abastecimiento de GNL está garantizado (España y gran parte de Europa) podrán hacer empleo del GNL; mientras que en tránsitos donde el GNL no sea accesible, pueden emplear el diésel como combustible principal. Se apuesta en este caso por los buques de nueva construcción ya que el reacondicionamiento de un buque de guerra para convertir su planta de propulsión en una dual y abrir paso así al empleo del GNL, se antoja una operación muy complicada desde el punto de vista técnico y operativo, así como demasiado costosa desde el punto de vista económico.

No sucede lo mismo en el caso de buques como las fragatas, los BAM o los buques de asalto anfibio, pensados para operar desplegados en escenarios de alta intensidad, donde la presencia del GNL puede suponer una limitación a sus capacidades operativas además de aumentar los potenciales riesgos que lleva consigo el almacenamiento a bordo de este combustible.

Finalmente, en lo referente al aspecto económico relacionado con la financiación de los nuevos proyectos, la apuesta por el GNL podría verse apoyada por fondos europeos destinados a la innovación tecnológica y al fomento de las energías limpias, lo cual podría suponer un alivio para los presupuestos de Defensa.

## **5.2 Líneas futuras**

A lo largo del planteamiento y desarrollo del proyecto han surgido distintas vías para la realización o perfeccionamiento del mismo, que finalmente no fueron abordadas o incluidas en este trabajo. Es por ello que, a modo de continuación con el eje de este trabajo, se proponen las siguientes líneas de investigación para futuros proyectos:

- Estudiar la viabilidad del diseño y construcción de buques de aprovisionamiento de combate, como los actuales Patiño y Cantabria, pero enfocados al suministro de GNL en alta mar, que permita el apoyo a las unidades desplegadas sin necesidad de hacer escala en puerto.
- Estudiar el acondicionamiento de la planta propulsora de los patrulleros Alborán, Arnomendi y Tarifa para incorporar motores duales diésel-GNL, de cara a una futura propuesta que permita alargar su vida operativa muchos más años tras un importante periodo de obras de modernización.
- Estudiar futuros combustibles navales ahora en desarrollo como el amoníaco, el metanol o el etanol y su posible incorporación a buques de la Armada.
- Estudiar el posible diseño de plantas combinadas para buques con propulsión eléctrica cuyos motores eléctricos estén alimentados por motores que empleen GNL, así como turbinas de gas que empleen GNL como combustible.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Harrington y G. Galvez, Historia de la Navegación, Revista Sucesos.
- [2] Ilobets, «El trirreme, estrella del Egeo,» Wordpress, 8 febrero 2013. [En línea]. Available: <https://crecientefertil.wordpress.com/2013/02/08/trirreme-la-estrella-del-egeo/>. [Último acceso: 29 diciembre 2020].
- [3] K. d. M. d. B. La Nao Victoria, «Altaya Model Space by Planeta De Agostini,» [En línea]. Available: <http://blog.model-space.es/barcos/kits-maquetas-barcos-la-nao-victoria/attachment/historia-nao-victoria-gohobby-3>. [Último acceso: 29 diciembre 2020].
- [4] Alejandro, «Arte Militar y Naval,» 17 abril 2017. [En línea]. Available: <http://www.artemilitarynaval.es/2017/04/navio-santisima-trinidad-navegando.html>. [Último acceso: 29 diciembre 2020].
- [5] «Retro Newser,» 17 agosto 2017. [En línea]. Available: <https://retronewser.com/2017/08/17/first-commercial-steamboat-service-inaugurated-210-years-ago-onthisday-otd-aug-3-1807/>. [Último acceso: 29 diciembre 2020].
- [6] L. De Mazarredo, Evolución de la Propulsión Naval Mecánica, FEIN, 1992.
- [7] J. Kepa, «Enseñanzas Náuticas,» 10 junio 2013. [En línea]. Available: <https://nauticajonkepa.wordpress.com/2013/06/10/la-helice/>. [Último acceso: 30 diciembre 2020].
- [8] «Kraftwerk Forschung,» [En línea]. Available: <https://kraftwerkforschung.info/en/quickinfo/basic-concepts/the-difference-between-steam-and-gas-turbines/>. [Último acceso: 30 diciembre 2020].
- [9] C. Rodríguez, «Tecnología Marítima,» 22 noviembre 2017. [En línea]. Available: <http://tecnologia-maritima.blogspot.com/2017/11/crucero-almirante-grau-ex-de-ruyter.html>. [Último acceso: 30 diciembre 2020].
- [10] C. Rodríguez, «Tecnología Marítima,» 17 septiembre 2018. [En línea]. Available: <http://tecnologia-maritima.blogspot.com/2018/09/motores-marinos-lentos-caracteristicas.html>. [Último acceso: 30 diciembre 2020].

- [11] C. Rodríguez, «Tecnología Marítima,» 27 mayo 2019. [En línea]. Available: <https://tecnologia-maritima.blogspot.com/2019/05/comparativa-entre-un-motor-diesel.html>.
- [12] «Armada Española,» [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/iniciohome/prefLang-es/>. [Último acceso: 30 diciembre 2020].
- [13] D. d. F. A. III, «Universidad de Sevilla,» [En línea]. Available: [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo\\_Brayton](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Ciclo_Brayton). [Último acceso: 30 diciembre 2020].
- [14] C. Rodríguez, «Tecnología Marítima,» 14 mayo 2017. [En línea]. Available: <http://tecnologia-maritima.blogspot.com/2017/05/turbinas-de-gas-aeroderivadas-para-la.html>. [Último acceso: 30 diciembre 2020].
- [15] «Sea Forces,» [En línea]. Available: <http://www.seaforces.org/marint/Royal-Navy/Frigate/F-88-HMS-Broadsword.htm>. [Último acceso: 30 diciembre 2020].
- [16] M. Á. Álvarez Feijoo, Máquinas y Motores Navales (Apuntes de la asignatura), 2019/2020.
- [17] E. P. Systems, «WARTISLA,» [En línea]. Available: <https://www.wartsila.com/marine/build/power-systems/electric-propulsion/electric-propulsion-systems>. [Último acceso: 30 diciembre 2020].
- [18] «US Navy,» [En línea]. Available: <https://www.navy.mil/Resources/Photo-Gallery/igphoto/2002347272/>. [Último acceso: 30 diciembre 2020].
- [19] A. t. H. E. D. a. G. Engines, «Mitsubishi Heavy Industries Group,» 2008. [En línea]. Available: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e451/e451021.pdf>. [Último acceso: 2 enero 2021].
- [20] A. A. P. D. T. D. D. L. P. P. C. E. B. MILITARES, «AEIPRO,» 2006. [En línea]. Available: [https://www.aepro.com/files/congresos/2006valencia/ciip06\\_2618\\_2627.881.pdf](https://www.aepro.com/files/congresos/2006valencia/ciip06_2618_2627.881.pdf). [Último acceso: 4 enero 2021].
- [21] P. M. P. EMBARCACIONES, «CITE energía,» [En línea]. Available: <http://www.citeenergia.com.pe/wp-content/uploads/2016/09/Cesar-Moreno-Tarazona.pdf>. [Último acceso: 7 enero 2021].
- [22] e. p. b. a. p. m. El Yamato-1 de 1992, «Va De Barcos,» 2020. [En línea]. Available: <https://vadebarcos.net/2020/09/05/el-yamato-1-de-1992-el-primer-barco-a-propulsion-magnetohidrodinamica/>. [Último acceso: 7 enero 2021].
- [23] Q. e. e. e. Magnus, «Sergio Hidalgo Site,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.sergiohidalgo.site/que-es-el-efecto-magnus-explicacion-del-gol-de-roberto-carlos/>. [Último acceso: 7 enero 2021].
- [24] B. d. r. F. E. E.-S. 1., «Va De Barcos,» 2014. [En línea]. Available: <https://vadebarcos.net/2014/04/28/buques-rotores-flettner-e-ship-1/>. [Último acceso: 7 enero 2021].
- [25] F. A. d. Suecia, «Forsvarsmakten,» [En línea]. Available: <https://www.forsvarsmakten.se/sv/>. [Último acceso: 25 febrero 2021].
- [26] L. F. Blázquez Morales, «Museo Virtual,» OEPM-UAM, 2016. [En línea]. Available: [http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias\\_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Herón](http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Herón)

%20de%20Alejandr%C3%ADa.xml. [Último acceso: 14 enero 2021].

- [27] R. Montilla, «Bodegas Mezquita,» [En línea]. Available: <https://www.bodegasmezquita.com/leonardo-da-vinci-cocinero-inventos/>. [Último acceso: 14 enero 2021].
- [28] «Ingeniería Automotriz,» 6 diciembre 2015. [En línea]. Available: <http://automotrizaudi.blogspot.com/2015/12/historia-del-automovil-1452-2000.html>. [Último acceso: 14 enero 2021].
- [29] J. C. Caraballo, «El Rincón Sapienete,» 4 mayo 2017. [En línea]. Available: <http://elrinconsapienete.blogspot.com/2017/05/la-automocion-en-el-ejercito-espanol.html>. [Último acceso: 14 enero 2021].
- [30] «Famous Inventors,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.famousinventors.org/john-barber>. [Último acceso: 14 enero 2021].
- [31] G. M. Solutions, «GE Marine Gas Turbines for Frigates,» 2018.
- [32] «Vessel Finder,» [En línea]. Available: <https://www.vesselfinder.com/es/vessels/QUEEN-MARY-2-IMO-9241061-MMSI-310627000>. [Último acceso: 15 enero 2021].
- [33] R.-R. Marine, 2016.
- [34] E. d. E. A. d. Escaño, Introducción a las turbinas de gas marinas, Ferrol: Armada Española.
- [35] «Universidad Nacoinal Experimental de Táchira,» [En línea]. Available: [http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F\\_DE\\_T-151.htm](http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-151.htm). [Último acceso: 18 enero 2021].
- [36] «Navantia,» [En línea]. Available: <https://www.navantia.es/wp-content/uploads/2018/05/F-110-La-Navantia-del-siglo-XXI-4.pdf>. [Último acceso: 20 enero 2021].
- [37] A. G. M. o. H. I. o. M. Ecosystems, «National Center for Ecological Analysis and Synthesis, University of California,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.nceas.ucsb.edu/globalmarine/impacts>. [Último acceso: 20 enero 2021].
- [38] Ó. d. A. e. Z. d. C. d. Emisiones, «Máquinas de Barcos,» 9 enero 2015. [En línea]. Available: <http://maquinasdebarcos.blogspot.com/2015/01/oxidos-de-azufre-en-zonas-de-control-de.html>. [Último acceso: 21 enero 2021].
- [39] K. Sund y A. Whitefield, «Gas prices today and going forward,» 2014.
- [40] «Molgas Energía,» [En línea]. Available: <https://www.molgas.es/actividad-y-servicios.html>. [Último acceso: 21 enero 2021].
- [41] I. 2. S. limits, «MySeaTime,» 9 diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.myseatime.com/blog/detail/imo-2020-sox-sulphur-limits>. [Último acceso: 21 enero 2021].
- [42] A. p. f. ships, «AirClim,» 12 abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.airclim.org/air-pollution-ships>. [Último acceso: 21 enero 2021].
- [43] T. A. Tran, «Research of the Scrubber Systems to Clean Marine Diesel Engine Exhaust Gases on Ships,» *Journal of Marine Science: Research and Development*, vol. 7, nº 243, p. 9,

2017.

- [44] «Ship And Bunker,» [En línea]. Available: <https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#MGO>. [Último acceso: 22 enero 2021].
- [45] E. COMMISSION, «EUROPE 2020 A strategy for smart, sustainable and inclusive growth,» 2020.
- [46] E. S.A., «LNG Market Study: Bottom Up Analysis,» 2018.
- [47] U. Europea, «CORE LNGas hive,» [En línea]. Available: <http://corelngashive.eu/es/sobre-el-proyecto/>. [Último acceso: 23 enero 2021].
- [48] «Marine Traffic,» [En línea]. Available: <https://www.marinetraffic.com/es/photos/of/ships/shipid:180905/ships>. [Último acceso: 23 enero 2021].
- [49] I. Bakas, «Principles of Marine Main Engines running on LNG,» de *Propulsion and Power Generation of LNG driven Vessels*, Piraeus, Greece, 2015.
- [50] Gasnam, Catálogo de motores marinos a gas natural, 2019.
- [51] F. Harteveld, «LNG BUNJKERING SUMMIT,» Barcelona, 2015.
- [52] «TOTE Inc,» [En línea]. Available: <http://www.toteinc.com/about/lng/>. [Último acceso: 25 enero 2021].
- [53] Gasnam, «Gas natural en el transporte 2020,» 2020.
- [54] G. Pita, Introducción al GNL, 2006.
- [55] DNV-GL, «Liquefied Natural Gas (LNG) Bunkering Study,» 2014.
- [56] S. C. Dimitrellou y E. Strantzali, «RETROFIT OF A RO-RO PASSENGER FERRY TO OPERATE ON LNG FUEL: A GREENER AND SAFE SOLUTION FOR SHORT-SEA TRANSPORTATION,» University of West Attica, Greece, 2020.
- [57] B. Torres, «ValenciaPlaza,» 15 junio 2019. [En línea]. Available: <https://valenciaplaza.com/Balerialinvierte260millonesenunaflotamssosteniblenuevebuquespropulsadosporGNL1>. [Último acceso: 27 enero 2021].
- [58] «Balearia,» [En línea]. Available: <https://www.balearia.com/es/flota/ferry-abel-matutes>. [Último acceso: 23 febrero 2021].
- [59] E. S.A, «Enagas,» [En línea]. Available: [https://www.enagas.es/enagas/es/Transporte\\_de\\_gas/PlantasRegasificacion](https://www.enagas.es/enagas/es/Transporte_de_gas/PlantasRegasificacion). [Último acceso: 28 enero 2021].
- [60] REGANOSA, «Regasificación del Noroeste S.A,» [En línea]. Available: <http://www.reganosa.com/es> . [Último acceso: 28 enero 2021].
- [61] B. O. D. E. V. 2. d. m. d. 2020, «BOE,» 20 marzo 2020. [En línea]. Available: [https://www.boe.es/eli/es/ins/2020/03/19/\(1\)/dof/spa/pdf](https://www.boe.es/eli/es/ins/2020/03/19/(1)/dof/spa/pdf). [Último acceso: 28 enero 2021].
- [62] J. d. A. L. d. l. Armada, «GUÍA TÉCNICA PARA LA OBTENCIÓN DE CERTIFICADOS DE ARQUEO Y CUMPLIMIENTO VOLUNTARIO MARPOL

EMITIDOS POR EL RTPN,» 2017.

- [63] N. C. Guard, «Kystverket,» [En línea]. Available: <https://www.kystverket.no/en>. [Último acceso: 13 febrero 2021].
- [64] F. B. Guard, «Rajavartiolaitos,» [En línea]. Available: <https://raja.fi/etusivu>. [Último acceso: 13 febrero 2021].
- [65] «G Captain,» [En línea]. Available: <https://gcaptain.com>. [Último acceso: 13 febrero 2021].
- [66] A. Española, Lista Oficial de Buques de la Armada, Madrid, 2020.
- [67] A. ESPAÑOLA, LISTA OFICIAL DE BUQUES DE LA ARMADA 2020, 2020.
- [68] DNV-GL, MARITIME FORECAST TO 2050, 2020.
- [69] C. F. M. Mateos, «Consumo de combustible DFM-F76 en la Armada,» Jefatura de Apoyo Logístico-Servicio de Combustibles, 2021.
- [70] J. M. Sanz, «Defensa,» 7 noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.defensa.com/espana/navantia-ha-disenado-nuevo-buque-logistico-para-ejercito-tierra>. [Último acceso: 10 febrero 2021].
- [71] «Fassmer,» [En línea]. Available: <https://www.fassmer.de/en/>. [Último acceso: 10 febrero 2021].