



**Universidad**  
de La Laguna

*Escuela Politécnica Superior de Ingeniería*

*Sección de Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval*

**Grado en Ingeniería Radioelectrónica Naval**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**“Baterías y Propulsión Híbrida”**

***Alumna:*** Patricia Hernández Rodríguez

***Tutor:*** José Ángel Rodríguez

Septiembre 2020



**José Ángel Rodríguez Hernández**, profesor del Área de conocimiento de Ciencias y Técnicas de la Navegación, del Departamento de Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima de la Universidad de La Laguna,

***Certifica:***

Que bajo mi dirección y supervisión, la alumna D<sup>a</sup> **Patricia Hernández Rodríguez** con DNI **78.645.860-M** ha realizado el presente Trabajo Fin de Grado titulado: "**Baterías y Propulsión Híbrida**".

Todo lo cual hago constar a los efectos oportunos.

En Santa Cruz de Tenerife a 11 de septiembre de 2020.

El Tutor

Fdo.: José Ángel Rodríguez Hernández

## *Resumen*

Desde un punto de vista crítico, este proyecto va a ser capaz de tocar todos los puntos más importantes en cuanto a nuevas tecnologías en cuestión de propulsión marina. Realizando un recorrido por los medios de propulsión convencionales a base de combustible fósil para llegar, en la actualidad, a la utilización de medios de propulsión más limpios y eficientes. Haciendo hincapié en las distintas normativas que se han aplicado año tras año para que tanto las empresas navieras como los buques implanten, de manera inmediata, los decretos y normas asociadas.

Se trata también en el proyecto del auge de la propulsión híbrida tanto diésel-eléctrica como la del uso del GNL y baterías y de cómo afecta económicamente la aplicación de estos cambios en los buques. Se realiza por otro lado también una comparativa general entre los tipos de propulsión que se encuentran hoy en día en auge. Los sistemas de propulsión por pilas de combustible e hidrógeno, gas natural, y el uso de las baterías son algunos de los temas que se van a tratar también como medio de difusión de la última información para conocer cómo se encuentra el sector marítimo en cuanto a combustible y nuevas tecnologías de propulsión.

## *Abstract*

From a critical point of view, this project will be able to cover all the most important points in terms of new technologies concerning in marine propulsion. We continue by looking since the primary source of marine propulsion to the most innovative for the clean mobility of ships, and how gradually science has significantly improved in technologies to reach, today, the use of clean and efficient propulsion. Emphasizing the different regulations that have been applied every year, so that both shipping companies and ships, implemented immediately associated laws and bay-laws.

The project also talks about the diesel-electric propulsion and LNG and batteries systems growth and how the implementation of these changes affects the normal use of ships. Also making an overall comparison between the types of propulsion that are currently growing.

Hydrogen fuel cell propulsion system, natural gas and the use of batteries are some of the topics that also be discussed as a means of disseminating the latest information to find out how the maritime industry currently faces in terms of fuel and new technologies propulsion.

## *Objetivos del proyecto*

El objeto de este proyecto es principalmente, tener una visión clara de dónde nos encontramos hoy en día con respecto al combustible fósil y los medios actuales de propulsión y trasladarla al ámbito marítimo. A su vez, se hace hincapié en las nuevas tecnologías, más concretamente, las tecnologías eléctricas e híbridas, así como el resurgimiento de las baterías como medios para apostar por la salud ambiental a la hora de llevar a cabo el comercio internacional. Esto supondrá un cambio radical también en el consumo y en la visión general de la navegación.

Las normativas que los organismos mundiales establecen son un punto importante a la hora de poner en práctica las medidas recomendadas, por eso es necesario conocer cuáles son las nuevas directivas que se aplican a los buques, los niveles de emisiones permitidos, las características de los motores principales, así como las alternativas a los combustibles convencionales disponibles, que obviamente suponen un cambio viable dentro de este sector.

Con los principios fundamentales de la electrónica, aplicada a la propulsión naval y con la incorporación de novedosas tecnologías, se intenta dar un giro a la propulsión convencional y contribuir a la

ralentización del cambio climático que se está produciendo de forma inminente en el planeta tierra.

# Índice de contenido

|   | Pág. |
|---|------|
| <b>Resumen</b> .....                                | 4    |
| <b>Abstract</b> .....                               | 5    |
| <b>Objetivos del proyecto</b> .....                 | 6    |
| <b>Índice de contenido</b> .....                    | 8    |
| <b>Índice de figuras</b> .....                      | 11   |
| <b>Índice de tablas</b> .....                       | 15   |
| <br>  |      |
| <b>Capítulo 1. Situación actual</b>                 | 17   |
| <b>Introducción</b> .....                           | 17   |
| <br>  |      |
| <b>Capítulo 2. Marco Legislativo</b>                | 25   |
| <b>Introducción</b> .....                           | 25   |
| 2.1 Tratado de París, Protocolo de Kyoto.....       | 26   |
| 2.2 Organización Marítima Internacional. OMI.....   | 28   |
| 2.3 Convenio MARPOL.....                            | 29   |
| 2.3.1 Niveles de contaminación Convenio MARPOL..... | 30   |
| 2.4 Nuevas Directivas.....                          | 34   |
| <br>  |      |
| <b>Capítulo 3. Propulsión Mecánica</b>              | 36   |
| <b>Introducción</b>                                 | 36   |
| 3.1 Combustible fósil.....                          | 37   |



|   |           |
|---|-----------|
| 3.2 Motor diésel.....                                       | 40        |
| 3.3 Impacto ambiental.....                                  | 43        |
| 3.4 Reducción de la contaminación.....                      | 45        |
| <b>Capítulo 4. Propulsión híbrida Diésel-Eléctrica</b>      | <b>50</b> |
| <b>Introducción</b>   | <b>50</b> |
| 4.1 Propulsión diésel-eléctrica en buques.....              | 52        |
| 4.2 Funcionamiento de una planta de propulsión híbrida..... | 54        |
| 4.3 Modos de funcionamiento.....                            | 56        |
| 4.3.1 Modos PTO/PTI.....                                    | 58        |
| 4.3.2 Modo híbrido.....                                     | 61        |
| 4.3.3 Propulsión híbrida en serie.....                      | 62        |
| 4.3.4 Propulsión híbrida en paralelo.....                   | 63        |
| 4.4 Propulsión Pod.....                                     | 65        |
| 4.4.1 Sistema eléctrico de los PODs.....                    | 70        |
| 4.5 Principales modelos y fabricantes híbridos.....         | 77        |
| <b>Capítulo 5. Baterías. Concepto y aplicaciones</b>        | <b>80</b> |
| <b>Introducción</b>   | <b>80</b> |
| 5.1 Funcionamiento general de las baterías.....             | 82        |
| 5.1.1 Principales conceptos de baterías.....                | 84        |
| 5.1.2 Clasificación de las baterías.....                    | 86        |
| 5.2 Baterías recargables.....                               | 87        |

|   |            |
|---|------------|
| 5.2.1 Baterías de plomo ácido.....                                  | 87         |
| 5.2.2 Baterías de níquel-cadmio.....                                | 90         |
| 5.2.3 Baterías níquel-hidruro metálico.....                         | 92         |
| 5.2.4 Baterías de ion-litio.....                                    | 94         |
| 5.3 Comparativa entre distintos tipos de baterías.....              | 96         |
| 5.4 Autonomía a bordo.....  | 98         |
| 5.5 Pilas de combustible.....                                       | 101        |
| 5.6 Clasificación de las pilas de combustible.....                  | 104        |
| 5.7 Pilas de combustibles a bordo.....                              | 106        |
| 5.8 Ventajas e inconvenientes del uso de pilas de combustibles..... | 109        |
| 5.9 Viabilidad.....   | 110        |
| <br>  |            |
| <b>Capítulo 6. Nuevas alternativas</b> .....                        | <b>112</b> |
| <b>Introducción</b> .....   | <b>112</b> |
| 6.1 Gas natural.....  | 114        |
| 6.2 Ventajas e inconvenientes de los combustibles marinos.....      | 120        |
| 6.3 Baterías y propulsión GNL.....                                  | 122        |
| <br>  |            |
| <b>Conclusiones</b> .....   | <b>126</b> |
| <b>Conclusions</b> .....  | <b>128</b> |
| <b>Bibliografía</b> .....   | <b>130</b> |

## Índice de figuras:

- **Figura 2.1** Zonas de Control de Emisiones.

<https://ingenieromarino.com/normativa-tecnologias-y-modificaciones-para-reducir-las-emisiones-de-sox-y-nox-a-la-atmosfera/>

- **Figura 3.1** Sistema de propulsión Diesel para buques.

<http://www.surcando.com/sistema-de-propulsion-diesel-para-buques-motor-diesel-de-4-tiempos-reductor-helice-de-paso-variable-21500-247047/#attachment/0/>

- **Figura 3.2** Contaminación por emisiones de buques.

<https://www.icndiario.com/2018/07/comienza-un-estudio-de-control-de-emisiones-de-buques-en-el-mediterraneo/>

- **Figura 3.3** Sistema EGR.

<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e501/e501055.pdf>

- **Figura 3.4** Sistema SCR.

<https://www.hitachiosen.co.jp/english/release/2015/07/001812.html>

- **Figura 4.1** Buque SS Normandie.

[https://es.wikipedia.org/wiki/SS\\_Normandie](https://es.wikipedia.org/wiki/SS_Normandie)

- **Figura 4.2** Planta de propulsión Diésel - eléctrica en buques.  
<https://www.nauticexpo.es/prod/stadt/product-32120-200622.html>
  
- **Figura 4.3** Esquema hibridación en los modos TPO/TPI  
<https://marine.mandieselturbo.com/docs/defaultsource/shopwaredocumentsarchive/hybrid-propulsion.pdf?sfvrsn=4>
  
- **Figura 4.4** Sistema Híbrido en Serie.  
<https://proyectosnavales.com/2016/07/17/propulsion-hibrida-diesel-electrica-en-barcos-de-recreo/>
  
- **Figura 4.5** Sistema Híbrido en Paralelo.  
<https://proyectosnavales.com/2016/07/17/propulsion-hibrida-diesel-electrica-en-barcos-de-recreo/>
  
- **Figura 4.6** Sistema Azipod.  
<https://new.abb.com/news/es/detail/24993/el-sistema-de-propulsion-azipodr-de-abb-puede-ahorrar-17-millones-de-dolares-en-combustible-al-ano-segun-unestudio>
  
- **Figura 4.7** Transformador rectificador de 6 y 12 pulsos.  
[https://library.e.abb.com/public/a783db9581b4d2fdc1256d280040faea/Technical\\_Guide\\_No\\_6\\_ES.pdf](https://library.e.abb.com/public/a783db9581b4d2fdc1256d280040faea/Technical_Guide_No_6_ES.pdf)

- **Figura 4.8** Esquema Cicloconvertidor.

<http://cpe.cl/ciclo.html>

- **Figura 4.9** Esquema Inversor conmutado en carga.

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.129.2768&rep=rep1&type=pdf>

- **Figura 4.10** Esquema Inversor de Fuente de Voltaje.

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.129.2768&rep=rep1&type=pdf>

- **Figura 5.1** Baterías eléctricas como medio de propulsión híbrido.

<http://masmar.net/index.php/esl/N%C3%A1utica/IndustriaN%C3%A1utica/M%C3%A1s-proyectos-de-energ%C3%ADa-el%C3%A9ctrica-para-reducir-emisioneseneltransporte-mar%C3%ADtimo>

- **Figura 5.2** Elementos básicos de una batería recargable. (Elaboración propia).

- **Figura 5.3** Funcionamiento de una batería de ion litio.

<https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2019/10/11/que-son-y-para-que-sirven-las-baterias-de-iones-de-litio/>

- **Figura 5.4** Diferencias en rendimiento. Sistema convencional y pilas de combustible.  
(Elaboración propia).
  
- **Figura 5.6** Funcionamiento pila de combustible.  
<https://www.youtube.com/watch?v=k3Ji0a0Bwik>
  
- **Figura 6.1** Buque GNL.  
<https://ibemar.net/el-comercio-de-gnl-crecera-un-8-en-2019-australia-preve-convertirse-en-el-mayor-exportador-de-gnl-en-2020/>
  
- **Figura 6.2** Distribución de la planta propulsora y tanques GNL del buque AidaNova.  
[70]
  
- **Figura 6.3** Tanques de GNL en sistema de propulsión dual (GNL- Diésel marino)  
<https://www.wartsila.com/twentyfour7/in-detail/boil-off-gas-handling-onboard-Ing-fuelled-ships>
  
- **Figura 6.4** Proyecto del primer pesquero híbrido GNL/baterías.

## Índice de tablas:

- **Tabla 1.1** Ranking de países de la Unión Europea con mayores subsidios en fuel. Datos estimados por T&E, basados en los datos de ventas de fuel de UNFCCC (2017) y EU National Road Diesel Taxes (2019).
  
- **Tabla 2.1** Niveles de contaminación convenio MARPOL.
  
- **Tabla 2.2** Límites de azufre en las Zonas de Control de Emisiones.  
[http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Sulphur-oxides-\(SOx\)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx](http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93-Regulation-14.aspx)
  
- **Tabla 4.1** Comparación motores eléctricos.  
<https://www.uv.es/emaset/iep00/descargas/motores-Sincronos-0809>
  
- **Tabla 5.1** Densidad energética en función del tipo de batería. (Fuente: IBM)
  
- **Tabla 5.2** Tasas C baterías.  
<https://tritec-intervento.cl/que-es-el-ritmo-de-descarga-deunabateria/#:~:text=Las%20tasas%20de%20carga%20y,proporcionar%201A%20durante%20una%20hora.>

- **Tabla 5.3** Tipos de pilas de combustible.

<https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>

- **Tabla 6.1** Ventajas y desventajas de los combustibles marinos



# Capítulo 1

## *Situación actual*

### **Introducción.**

Desde el descubrimiento de los primeros indicios de combustible fósil, la propulsión se ha visto obligada a utilizar máquinas que sean capaces de aprovechar estos minerales para usar la energía generada con el objetivo de poder desplazarse, en este caso, por el medio marino.

En la actualidad, el motor diésel domina la propulsión marina desde hace ya bastantes años, y su uso supone el mayor consumo de combustible fósil usado como fuente de energía. Sin embargo, en las últimas décadas problema de la sostenibilidad, el cambio climático y las emisiones a la

atmósfera, han provocado que estos medios de propulsión se planteen seriamente su existencia de cara a un futuro sostenible. Hay que tener en cuenta, que solo en España, aproximadamente el 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero son producidos por el transporte, de los cuales, el 3%, se producen por el sector del transporte marítimo, mientras que en Europa este porcentaje supera el 30%. Por esa razón, conjuntamente con las nuevas normativas medioambientales, la subida cada vez más notable de los impuestos sobre emisiones y los precios del combustible, hacen cada vez más necesario el uso de una alternativa al diésel. [1,2,3]

El tráfico marítimo mundial está en aumento y aunque se han reducido las emisiones mediante el uso de motores más limpios y eficientes, aún existe un gasto considerable de combustible, además de grandes cantidades de emisiones a la atmósfera.

En estos momentos, el uso de estos combustibles fósiles también continúa estando en auge, sin embargo, van apareciendo nuevas alternativas más limpias al carbón, como es el caso del uso del gas como medio de propulsión. Muchas empresas apuntan hacia un modelo energético más limpio y en pocos años, la demanda de Gas Natural Licuado (GNL) se ha visto aumentada considerablemente. China, en 2017, fue uno

de los países impulsores de este tipo de negocio y Catar es el primer exportador de GNL del mundo. De manera progresiva, los países se van sumando a esta iniciativa igualando precios y haciendo al mercado del transporte marítimo más competitivo y eficiente. Hay que tener en cuenta que más del 90% del comercio de todo el mundo se desarrolla a través del mar. Actualmente existen aproximadamente 54.000 buques operando para el intercambio de mercancía a nivel mundial según la *Lloy's Register Fairplay*<sup>1</sup>. Es por tanto necesario un cambio drástico en la manera de gestionar esta industria centrandolo el foco en eliminar o reducir las emisiones de carbono. [4, 5]

Sin embargo, y a pesar de la tenaz insistencia que durante años han mantenido diferentes organismos internacionales por reducir los niveles de contaminación, mediante la regulación de leyes y normativas, sigue sin haber nada claro con respecto a este sector.

En las últimas décadas, la Organización Marítima Internacional (OMI) intenta, por todos los medios, disminuir las emisiones de azufre que se vierten a la atmósfera cada año, a través de alternativas sostenibles o, en algunos casos, mediante la utilización de equipos o sistemas que limpian el

---

<sup>1</sup> *LRF: Servicio de organización técnica y empresarial y sociedad de clasificación marítima.*

azufre emitido por los motores. De esta manera, se asegura el cumplimiento de las nuevas directivas, algunas de ellas entrarán en vigor este 2020.

Pero no solo contra la contaminación deben de hacer frente estas organizaciones, según la Federación Europea de Transporte y Medio Ambientes (*European Federation for Transport & Environment*) conocida por las siglas T&E, se ha publicado recientemente la existencia de un subsidio de 24 mil millones de euros al año, destinado a la exención de impuestos al combustible fósil en el transporte marítimo, y no solo eso, este subsidio se encuentra bajo la legislación de la Directiva Europea de Impuestos de Energía (*ETD*). Se trata de un impedimento más al avance en la reducción de emisiones, ya que esa cantidad de dinero podría ser destinada a la ecologización de la economía europea, en especial el sector marítimo, por ejemplo, con inversiones para infraestructuras portuarias verdes o subsidios operativos. [7]

Es sabido que el transporte marítimo es el único sector que aún no contribuye a los esfuerzos climáticos de la Unión Europea. Con 140 millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> al año, este sector contribuiría al cambio climático más que las economías individuales de los 20 estados miembros de la UE en su conjunto. Además, se estima que las emisiones crecerán en

33 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año y todo esto debido a la falta de leyes climáticas europeas con respecto al sector marítimo y la existencia de subsidios fiscales masivos, que alimentan esta tendencia, según fuentes de la propia *T&E*<sup>2</sup>. [8]

A modo informativo y a la vez comparativo entre los diferentes países de la UE, en la tabla 2.1 se refleja, por un lado, la cantidad (kilotoneladas) de fuel utilizado, y por otro, los subsidios a los combustibles fósiles (Euros al año). [6]

---

<sup>2</sup> ***Transport and Environment***: Federación Europea de Transporte y Medioambiente.

| Países   | Envío de Fuel Marino<br>(Kilotoneladas) | Ingresos Fiscales no<br>percibidos (Euros/año) |
|----------|---|--|
| Holanda  | 11.757                                  | 6.060.774.193                                  |
| Bélgica  | 7.398                                   | 4.576.273.567                                  |
| España   | 6.762                                   | 2.649.393.339                                  |
| Italia   | 2.241                                   | 1.432.233.353                                  |
| Suecia   | 2.241                                   | 1.134.718.400                                  |
| Francia  | 1.758                                   | 1.105.646.454                                  |
| Malta    | 2.172                                   | 1.052.430.174                                  |
| Alemania | 2.044                                   | 990.298.597                                    |

Tabla 1.1 Datos estimados por T&E.

Se observa el ranking de los 10 primeros países que cuentan con un mayor subsidio (en euros) al año dentro de la Unión Europea, encontrándose España en tercer lugar como país beneficiario de este subsidio anual, por detrás de Holanda y Bélgica.

Por otro lado, el pasado mes de enero, se aprueba por fin, la nueva normativa marítima IMO 2020, siendo una de las normativas de mayor

importancia a nivel mundial, con vistas a reducir las emisiones de azufre (de un 3.5% a un 0.5%). De esta forma, observamos que poco a poco se pretende implantar de manera obligatoria medidas para que, por un lado, se reduzca de forma considerable las emisiones y por otro, evitar políticas que favorezcan la contaminación ambiental mundial. [9]

Hay que considerar que existen nuevos combustibles fósiles en auge como es el Gas Natural y se espera que sea la transición entre los combustibles fósiles convencionales y las nuevas alternativas limpias. Este cuenta con un mayor poder calorífico que en el caso del diésel, haciéndolo beneficioso en cuanto a reducción del consumo específico del propio motor, y reduciendo a su vez la temperatura máxima en el interior del cilindro consecuencia de su alto calor específico. De esta manera, se reducen las emisiones de NOx lo que conlleva a numerosas ventajas medioambientales. Su establecimiento requiere, por otro lado, una inversión relativamente baja por lo que es una opción viable para ser utilizada a corto y medio plazo. [10, 11]

Lo que se pretende en la actualidad es el remplazo de los combustibles provenientes de fuentes fósiles para dejar paso a los

combustibles alternativos como pueden ser el biodiésel, metanol, etanol, el uso de la electricidad almacenada en pilas o pilas de combustible, el hidrógeno, etc. Medidas como la implantación de los nuevos reglamentos, en el caso de IMO 2020, el cual tendrá un impacto importante en el ámbito marítimo que conlleva a reducir así las emisiones en este sector hasta un 85%. Se trata de un camino lento, pero en el cual ya se han puesto en marcha diversos organismos internacionales, a la espera de reorganizar los precios para que supongan un coste inferior y que tanto las navieras como los armadores tengan disponibilidad para implantar las normas de manera eficiente. Todo apunta a que el uso del GNL, como nombrábamos antes, será el primer paso hacia un transporte sostenible. [12]



# Capítulo 2

## *Marco Legislativo*

### **Introducción**

Son muchas las maneras en las que se intenta reducir las emisiones que se envían a la atmósfera tanto, por parte de las industrias, como del transporte en general. Es por esa razón que hace ya unos años se ha intentado implantar una serie de normas para evitar en la medida de lo posible estos problemas medioambientales que nos achacan diariamente entre la comunidad científica y los medios de comunicación.

Para que todo lo que se establece en los objetivos de los capítulos

anteriores tenga lugar, es necesario la actuación inmediata de los organismos encargados de establecer las normativas a favor del medio ambiente, entre ellos se destacan a nivel internacional:

- El Tratado de París
- El Protocolo de Kyoto
- La Organización Marítima Internacional
- El Convenio MARPOL
- Las nuevas Directivas

## **2.1 Tratado de París, Protocolo de Kyoto.**

El cambio climático es un hecho el cual se ha querido ralentizar en la medida de lo posible. A finales de 2015 se firma por más de 195 países el *Tratado de París* con el fin de establecer medidas que pudieran reducir emisiones de los gases de efecto invernadero. Sin embargo, existían sectores dentro del tratado que no habían sido mencionados, entre ellos el sector marítimo o el de aéreo y, además, es de carácter voluntario, por lo que quedaba en el aire muchas de las consideraciones que se establecían y la mayoría de las veces no se llevaban a cabo. [13]

A nivel mundial, el control de las emisiones estuvo fijado por el *Protocolo de Kyoto*, a través de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, cuyo objetivo era la reducción de los gases de efecto invernadero por debajo del 15% entre los años 2008 y 2012 con respecto a los años 1990-1995.

De forma periódica, la Unión Europea también desarrolla medidas relacionadas con la emisiones, pero siempre dependiendo del tipo de transporte, quedando estas medidas en manos de las industrias, la mayoría de las cuales evitaban llevar a cabo las recomendaciones que la UE les establecía, ya que no suponía un requisito obligatorio. Era necesario que la Unión Europea, tomara consideración ante este desequilibrio y también en el ámbito del transporte marítimo para reducir las emisiones atmosféricas. Uno de los principales problemas era que estas emisiones no se producen solo en alta mar durante la navegación, también afectan a las zonas costeras y terrestres pudiendo ocasionar serios problemas medioambientales y a nivel de salud dentro de la población, por lo que había que recurrir a normas más específicas dentro del ámbito marítimo. [14]

## 2.2 Organización Marítima Internacional. OMI.

Es la *Organización Marítima Internacional*, organismo dentro de las Naciones Unidas, la encargada de la seguridad y protección de la navegación. Es uno de los principales organismos a nivel mundial cuyo objetivo es eliminar o reducir la contaminación del mar debido a los buques. En los últimos años, la OMI ha llevado a cabo planes de medidas para frenar el cambio climático. Planes como el de gestión energética de buques para establecer un consumo eficiente de combustible, o la creación de sistemas de propulsión y proyectos de hélices para reducir el consumo de combustible. Una de las medidas utilizadas para disminuir las emisiones fue la disminución de la velocidad de los buques en un 10%, reduciendo a su vez un 20% de las emisiones generadas y dependiendo del tipo de buque incluso hasta un 30%. Este reto está en manos también de las compañías marítimas que necesitan unos precios competitivos, ya que, como sabemos, el combustible supone una parte fundamental de los gastos. Se pretende, por tanto, un uso eficiente del carbono, y a su vez reducir la factura del combustible utilizado a bordo. [15]

En la actualidad se desarrollan una serie de medidas con el objeto de reducir las emisiones y las partículas contaminantes algunas de ellas son la

instalación de filtros de lavado, la utilización de gas natural licuado, o el uso de sistemas de recirculación de gases, entre otros, los cuales se establecerán más adelante en el trabajo.

### **2.3 Convenio MARPOL.**

Dentro del *Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques*, en el anexo VI, se establece también las restricciones de los principales contaminantes de la atmósfera provenientes de los buques, como son los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno, prohibiéndose las emisiones de sustancias que destruyen la capa de ozono. Este anexo es revisado posteriormente a su primera entrada en vigor en 2005, para una reducción mayor de estas emisiones mediante las mejoras en las tecnologías y la implantación de nuevas medidas revisadas. Los cambios principales que se producen en ese nuevo anexo son, por un lado, la reducción del límite máximo (a nivel mundial) de azufre en un **0,50%** y que se implantan a partir del 1 de enero de 2020. Por otro lado, los límites de los óxidos de azufre junto con las de óxido de nitrógeno y partículas contaminantes se deberán reducir un **0,10%**. Siendo la reducción de NOx de los motores diésel marinos a un Nivel II<sup>3</sup> para aquellos buques cuyo motor

---

<sup>3</sup> Niveles de contaminación correspondientes al Convenio MARPOL.

se haya instalado a partir del 1 de enero de 2011 y un nivel mayor para aquellos motores de buques construidos a partir del 1 de enero de 2016 y que estén navegando en la *Zona de Control de las Emisiones de Norteamérica y Zona de Control de las Emisiones del Mar Caribe de los Estados Unidos, (ECA)*.

Para los buques que cuenten con motores diésel marinos los cuales hayan sido construidos entre el 1 de enero 1990 y el 1 de enero de 2000, cumplirán con los límites del Nivel I de emisiones. [16]

### **2.3.1 Niveles de Contaminación dentro del Convenio MARPOL.**

Para conocer a qué se refiere cada uno de los niveles, se establece los niveles de óxidos de nitrógeno producido por los motores diésel marino instalados en buques. Datos recogidos del Anexo VI del *Convenio MARPOL*.

| Niveles | Fecha de construcción del buques   | Límites de emisión g/kWh (n=régimen nominal del motor)  |
|---------|--|---|
| I       | 1 enero 2020   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 17,0 si <math>n &lt; 130</math> rpm.</li> <li>- <math>45.n^{(-0,2)}</math> si <math>2000 &gt; n &gt; 130</math> rpm.</li> <li>- 9,8 si <math>n &gt; 2000</math> rpm.</li> </ul>  |
| II      | 1 enero 2011   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 14,4 si <math>n &lt; 130</math> rpm.</li> <li>- <math>44.n^{(-0,23)}</math> si <math>2000 &gt; n &gt; 130</math> rpm.</li> <li>- 7,7 si <math>n &gt; 2000</math> rpm.</li> </ul> |
| III     | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 1 enero 2016 o posterior.</li> <li>▪ Buques que operen en zona de control de emisiones.</li> <li>▪ Motores diésel marino instalados en buques con potencia combinada de propulsión del motor inferior a 750 kW</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 3,4 si <math>n &lt; 130</math> rpm.</li> <li>- <math>2,9.n^{(-0,2)}</math> si <math>2000 &gt; n &gt; 130</math> rpm.</li> <li>- 2,0 si <math>n &gt; 2000</math> rpm.</li> </ul>  |

Tabla 2.1. Niveles de contaminación convenio MARPOL.

Desde el año 1960 la OMI ha intentado reducir los efectos producidos por el transporte marítimo y junto con el MARPOL, se aborda el tema de la contaminación atmosférica en este sector e intentando controlar sus efectos mediante medidas que reduzcan las emisiones. Esta reducción de emisiones, como vimos anteriormente, se realiza mediante la introducción de un límite mundial para, por ejemplo, el contenido de azufre de fueloil. Esos límites mundiales estuvieron en un 3,50 % masa/masa desde el año 2012, actualmente se encuentra en un 0,50% masa/masa recién aplicado en enero de este año 2020, siendo los buques que se encuentran bajo esta

normativa **OMI 2020**, aquellos que cuenten con motores diésel marino con una potencia de salida superior a 130KW, o que hayan sido objeto de transformación importante el 1 de enero de 2000 o posteriormente. Estas prescripciones son aplicables en las zonas de control de emisiones las cuales comprenden la zona del mar Báltico y la zona del mar del Norte, además de la zona marítima que estén establecidas por la Organización incluidas las zonas portuarias. Son los Estados Miembros de la OMI los que finalmente consideren dichas medidas para poder ser llevadas a cabo. [17]

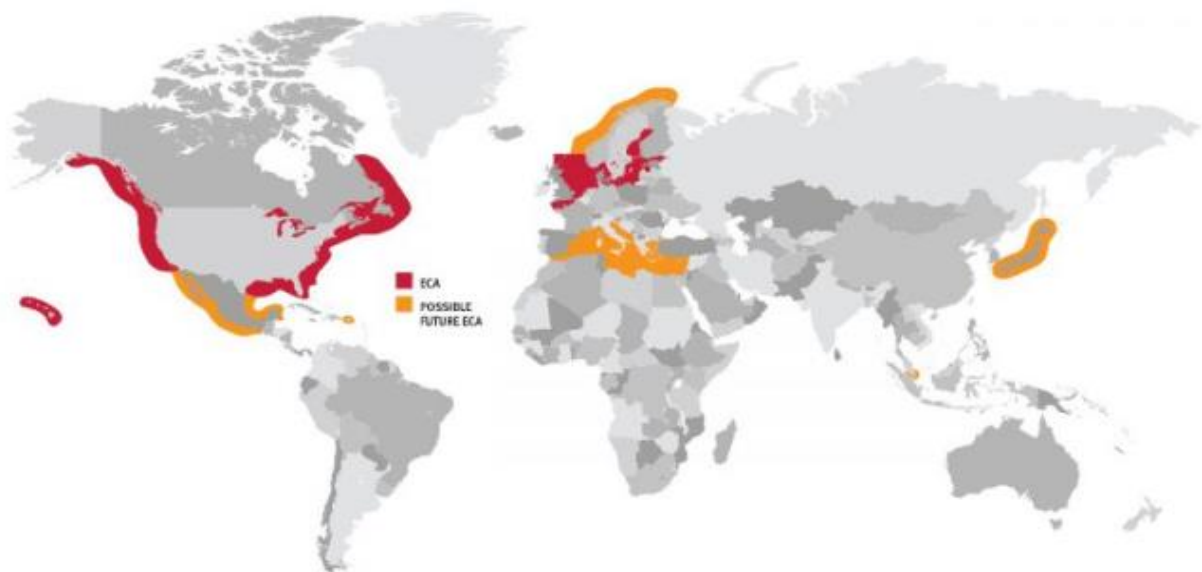


Figura 2.1 Zona de Control de Emisiones.[18]

Las Zonas de Control de Emisiones son áreas que cuentan con un elevado nivel de tráfico marítimo por lo que están más expuestas a las



emisiones que generan los buques cuando navegan es esas zonas. Es por esa razón por la que se establecen límites de azufre menores que si se navegara en otras zonas. Estos controles de emisiones de óxidos de azufre son aplicados a los equipos que utilizan fueloil a bordo, tanto en motores auxiliares como en calderas o generadores de gas. [18]

En la *Figura 2.1* se muestran cada una de las áreas de control y son las siguientes:

- Las **Zonas del mar Báltico**, se establecen límites de óxidos de azufre.
- Las **Zonas del Mar del Norte**, se establecen límites de óxidos de azufre.
- La **Zona de Norteamérica**, se establecen límites de óxidos de azufre, óxidos de nitrógenos y partículas en suspensión (PM).
- La **Zona del mar Caribe**, se establecen límites de óxidos de azufre, óxidos de nitrógenos y partículas en suspensión (PM).

A la hora de navegar por las diferentes Zonas, los buques están sometidos a legislaciones internacionales sobre emisiones con límites de óxidos de azufre, de nitrógeno o de partículas en suspensión, tanto si estos navegan en las ECA, como si lo hacen en cualquier otra área marítima. Los límites son diferentes, siendo más restrictivos en las Zonas de Control de Emisiones. A continuación, en la *Tabla 1.2* se establecen los límites de azufre

permitidos, que son los que más se han restringido en las últimas décadas.

| AÑO DE IMPLANTACIÓN DE LOS LÍMITES DE AZUFRE | LÍMITE DE AZUFRE |
|--|------------------|
| Antes del 1 de julio de 2010                 | 1,50%            |
| A partir del 1 de junio de 2010              | 1,00%            |
| A partir del 1 de enero de 2015              | 0,10%            |

Tabla 2.2 Límites de azufre en ECA. OMI

Observamos que a medida que pasan los años, los límites se han vuelto más restrictivos, en la actualidad las Zonas de Control de Emisiones se encuentran con un límite de 0,10% de azufre, mientras que fuera de esas áreas, se establece en un 0,50% a partir del 1 de enero de 2020.

## 2.4 Nuevas Directivas.

Por otro lado, la *Directiva (UE) 2016/802 del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de mayo de 2016*, entra en vigor para reducir las emisiones de dióxido de azufre producidas por la combustión de combustibles líquidos, con el objeto de conseguir una calidad de aire óptima que no suponga un riesgo tanto para el medio ambiente como para la propia salud de las personas. En este decreto, se regulan los contenidos máximos

de azufre de los combustibles que se destinan a uso marítimo, acotando su extensión a las aguas territoriales, zonas económicas exclusivas y zonas de control de contaminación, tanto para buques de pasajeros con servicios regulares como buques atracados en puerto. Cada uno de los artículos estipula de forma clara los aspectos a tener en cuenta dentro del Decreto, estableciendo también contenido máximo de azufre para uso marítimo, métodos para reducir dichas emisiones y las medidas financieras necesarias para mitigar los efectos que pudieran devenir de la aplicación de esta Directiva. [19]

El fin de todas estas normativas son sin duda, y como ya se ha nombrado en numerosas ocasiones, producir el menor impacto ambiental posible, de esta manera no solo cuidaremos el medio ambiente, sino se ayudará a prevenir posibles enfermedades en el ser humano debido a una mejora en la calidad del aire en las zonas cercanas a puertos. Todas estas medidas se quedan cortas si observamos las miles de fuentes de contaminación que contribuyen al aumento de los gases de efecto invernaderos, pero es un paso importante en un sector que es responsable de una buena parte del comercio nacional e internacional, y que poco a poco va adaptando sus medios de propulsión hacia un horizonte más limpio.

# Capítulo 3

## *Propulsión Mecánica*

### *Motor Diesel Marino*

#### **Introducción.**

Antes de explicar las actuales alternativas que existen con respecto al combustible fósil vamos, sin adentrarnos mucho en la parte mecánica y de forma general, a establecer los principios fundamentales de un motor diésel, explicando de manera breve como funciona un motor diésel marino para entender, a grandes rasgos, su consumo, así como el gasto energético que requiere. Posteriormente vamos a esclarecer, a modo de comparativa, las características de los motores convencionales y los alternativos más

ecológicos, comenzando con los combustibles fósiles, como principio fundamental para entender los orígenes de la propulsión y del uso del diésel a bordo.

### **3.1 Combustible fósil.**

Como bien sabemos, los combustibles fósiles aparecen de la descomposición natural de la propia materia orgánica a partir de un proceso que se alarga miles de millones de años. El petróleo, el carbón o el gas natural son ejemplos de este tipo de combustibles denominados recursos naturales limitados, llamados así debido a que no se renuevan con facilidad.

A partir de la Revolución Industrial, el combustible fósil se comenzó a usar en transporte y máquinas. Poco a poco se fue haciendo hueco en nuestras casas, como en cocinas, generadores eléctricos, estufas, etc. Su aplicación comercial e industrial es indudable, como en el uso de hornos o calderas. Pero debemos echar un vistazo atrás para conocer cómo funciona este tipo de combustible, así como sus efectos a corto y largo plazo y como actúa de forma desfavorable en nuestras vidas.

Actualmente es la principal fuente de energía mundial ya que posee

un alto poder calorífico si los comparamos con otras energías como la energía solar, eólica, etc., por lo que lo hace ser uno de los combustibles más demandando.

Desde siempre, el petróleo ha aparecido naturalmente en algunas partes del mundo, pero se utilizaba como material para pegar materiales o incluso en el ámbito de la medicina. Más adelante, se van perfeccionando la forma en la que se realiza el refinado y descubren nuevos productos que se utilizarían para las maquinarias de la época, como medio de engrase. Posteriormente, el carbón fue utilizado de forma masiva en los buques que poseían máquinas de vapor. Durante el siglo XX su precio comenzó a aumentar considerablemente por lo que hubo que realizar un cambio en el uso habitual de estos combustibles pasando al uso de combustibles fósiles en forma líquida. [20]

Sin embargo, fue la invención de los motores de combustión interna lo que impulsó la utilización del petróleo y sus derivados, como la gasolina. Tras años de evolución y perfeccionamiento de los motores, aparece en 1960 la Organización de Países Exportadores de Petróleo y a raíz de ahí emergen diferentes agencias internacionales para la coordinación por parte de los países consumidores de petróleo, de las medidas requeridas para el

abastecimiento y uso del crudo. [21]

Es importante conocer los combustibles más utilizados en la propulsión marina, Fuel Oil (IFO180), Fuel Oil (IFO 380), Gas Oil Marino, Diesel Oil. A continuación, se establecen sus características generales, además de aclarar un poco más en profundidad estos derivados del petróleo y comprender, dado su composición, la importancia de su eliminación o reducción.

El Fuel Oil 380 (IFO 380), es un tipo de combustible dentro de los conocidos como fueles residuales. Está compuesto por una mezcla de combustibles destilados y residuales con el objetivo de adaptarse mejor al manejo y a la viscosidad necesaria para poder ser utilizada en diferentes equipos. Es muy común encontrarlos en calderas, grandes motores Diesel, entre otros. Tanto el Fuel Oil 180 como el 380 se conocen como fuelóleos intermedios (IFO) llamados así porque son el resultado de la mezcla de combustibles ligeros (gasóleo o diésel marino) con combustibles residuales, y se diferencian en su viscosidad. Su contenido máximo de azufre es inferior al 1%, debido a que han sido desulfurados. Los Fuel Oil son más baratos en comparación con otros combustibles utilizados en el ámbito marítimo.

El Gas Oil Marino es utilizado en motores de pesqueros o embarcaciones

pequeñas, además de en plantas auxiliares de energía para buques mercantes. Está compuesto por 75% de hidrocarburos saturados y el resto hidrocarburos aromáticos.

El Diesel Oil se utiliza para motores diésel marinos o generadores. Está compuesto por una mezcla de hidrocarburos destilados además de aceites de cracking catalítico<sup>4</sup>. Este combustible no genera tantos residuos de combustión o cenizas, es decir, produce menos emisiones de óxidos de azufre debido principalmente a que se trata de un combustible más refinado. Comercialmente se conocen como DMA (Marine Gas Oil/MGO) y DMB (Marine Diesel Oil/MDO), diferenciándose uno del otro en su viscosidad, densidad y contenido en azufre.

Es importante conocer estos datos ya que de ellos va a depender el uso al que se destinen unos u otros combustibles, además de las zonas en las que se les restringe o no la navegación para que supongan el menor impacto medioambiental posible. [22, 23]

### **3.2 El motor diésel.**

El funcionamiento de un motor diésel está basado en la utilización del calor que se produce durante la combustión para la producción de energía.

---

<sup>4</sup> **Cracking catalítico:** proceso de refinación del petróleo basado en su descomposición a través de un catalizador.



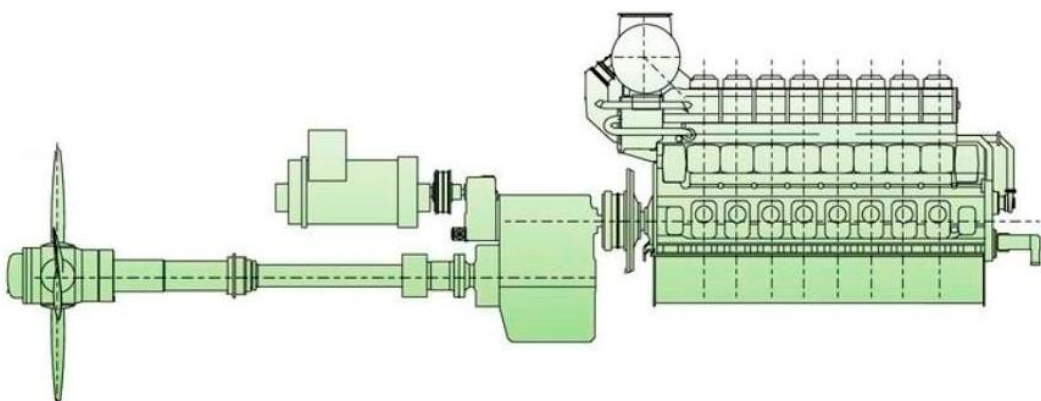
El combustible mezclado con el aire del interior de los cilindros va a producir un empuje que mueve cada uno de los pistones haciendo que estos, mediante las bielas y el cigüeñal, transformen el movimiento vertical que se produce en un movimiento circular y puedan mover las hélices.

Estos motores se pueden diferenciar en función de varias características, pero principalmente podemos hacer una distinción según su velocidad de rotación (rpm): motores de dos tiempos de baja velocidad, de cuatro tiempos de velocidad media y de cuatro tiempos de alta velocidad. Los buques generalmente cuentan con motores diésel de media y baja velocidad como medio de propulsión principal. El uso de los motores diésel rápidos o de alta velocidad se reduce como medio de propulsión auxiliar para generar la energía eléctrica necesaria a bordo, sus aplicaciones son muy limitadas ya que quema Gas Oil, perjudicial para el medio ambiente.

Los motores de baja velocidad, también llamados motores lentos ya que trabajan entre 80 y 140 rpm, permiten el uso de Fuel Oil de alta viscosidad. Estos motores consumen, como es de esperar, cantidades menores de combustible que los motores medios o rápidos, por lo que abarata el mantenimiento.

Por otro lado, se encuentran los motores de media velocidad o semirápidos con aproximadamente 1000 rpm. Cuentan con cambios de velocidad y de cargas mejores que los motores de baja velocidad, utilizan el Fuel Oil de alta viscosidad o Diesel Oil como combustible y disponen además de un control de emisiones. Este tipo de motor se suele utilizar en ferrys o buques “Ro-Ro”, mientras que los motores lentos se instalan en graneleros o portacontenedores. [24, 25]

En las últimas décadas se ha intentado por todos los medios reducir el consumo de combustible, de ahí la idea del uso de los motores diésel de baja velocidad, cuyo ahorro de combustible se consigue mediante el aumento de las presiones máximas y la relación entre la carrera y el diámetro del pistón, reduciendo considerablemente el consumo.



*Figura 3.1 Motor Diésel convencional para buque.*

Es necesario establecer una distinción entre los motores diésel en general y los motores diésel marinos. Estos últimos cuentan con un sistema de refrigeración por agua, además de disponer de una reductora. El sistema de refrigeración puede realizarse mediante dos procesos diferentes, el primero, mediante refrigeración a través de la entrada de agua de mar al interior del motor, o bien, utilizar el agua de mar para la refrigeración de un circuito cerrado de agua dulce, el cual va a circular a través del propio motor. Todas las demás características son similares a los motores diésel convencionales por lo que su funcionamiento, como vimos en el apartado anterior, se sigue realizando de la misma manera en los motores diésel marinos. [26]

### **3.3 Impacto ambiental.**

Una de las características del petróleo y la más contaminante es la insolubilidad en agua, por lo que resulta muy difícil eliminar. En el caso de combustión de alguno de los derivados del petróleo se puede producir CO<sub>2</sub>, óxidos de azufre, óxidos nitrosos, entre otros principales gases de efecto invernadero. Los casos de derrames producen la mayor cantidad de contaminación oceánica, afectando no solo a la atmósfera, también a la fauna marina modificando en gran medida el ecosistema. Constantemente

se observa que el uso de los combustibles fósiles daña considerablemente al medio ambiente, de ahí la necesidad de invertir en planes y normativas que eviten los excesos de emisiones. Poco a poco estos combustibles serán sustituidos en su mayoría por fuentes de energía renovables, principalmente debido al problema ambiental y todas sus particularidades, pero también por la posibilidad de que estas fuentes de combustible fósil lleguen a su fin. [21]



*Figura 3.2 Contaminación producida por buques.*

Cuando hablamos de combustibles fósiles también debemos hacer hincapié en el gas natural, cuya demanda continúa también en aumento, así

como su producción mundial donde también se encuentra Estados Unidos como principal productor a nivel mundial. Este combustible fósil cuenta con un menor impacto medioambiental en todas sus etapas desde la extracción hasta su uso como combustible. Su producción de CO<sub>2</sub> en comparación con otros combustibles es mucho menor, esto es así por la alta cantidad de hidrógeno-carbono que contienen sus moléculas. Sin embargo, un causante del efecto invernadero es el metano, componente principal del gas natural, a pesar de que el tiempo que este permanece en la atmósfera es menor que en comparación con el Dióxido de Carbono. [27]

Es necesario la búsqueda de alternativas a medio y largo plazo a nivel reglamentario que se adecuen a las necesidades comerciales y económicas de cada país como ya vimos, pero también mediante la implantación de sistemas que puedan reducir los niveles de emisiones a corto plazo.

### **3.4 Reducción de la contaminación.**

Ya habíamos comentado en capítulos anteriores, la situación actual en cuanto contaminación por parte de los buques, y las medidas adoptadas para evitar grandes cantidades de emisiones a la atmósfera. En este apartado se pretende conocer cuáles son algunas de las medidas adoptadas por la Organización Marítima Internacional (IMO), para reducir esos niveles

de forma mecánica a través de sistemas específicos y cómo afecta al desarrollo del propio motor.

Existe una agencia llamada *Environmental Protection Agency* que, junto con la Comisión Europea, establecen limitaciones tanto dentro de Estados Unidos como de la Unión Europea con respecto a las emisiones contaminantes. Pero no solo las normativas son necesarias para evitar estas emisiones, también es necesario establecer algunos métodos de reducción en los propios motores diésel. Estas reducciones se basan en disminuir tanto las cantidades de oxígeno como de nitrógeno en el interior de estos motores, así como la de descender los picos de temperatura y reducir el tiempo de exposición en la que se encuentran los gases de combustión a esas temperaturas altas.

Alguno de los métodos que se utiliza para la reducción, por ejemplo, del  $\text{NO}_2$  en los motores marinos, es mediante el agua, al tener un calor específico superior al del aire el propio calor específico de los gases en el interior del cilindro se eleva cuando añadimos agua, de esta forma reducimos esas emisiones de los óxidos de nitrógeno que se vierten a la atmósfera.

Otro método usado en las reducciones de  $\text{NO}_x$  es mediante la recirculación de una parte de los gases de escape conocido en inglés por las siglas EGR, *Exhaust Gas Recirculation*. Esos gases se mezclan con el aire y como consecuencia, la temperatura de combustión disminuye, por lo tanto, también lo hace el  $\text{NO}_x$ . Este sistema, al igual que ocurría con el agua, reduce la formación de  $\text{NO}_x$ . Sin embargo, produce un inconveniente, se generan grandes cantidades de humos, y un aumento del consumo de combustible.[28]

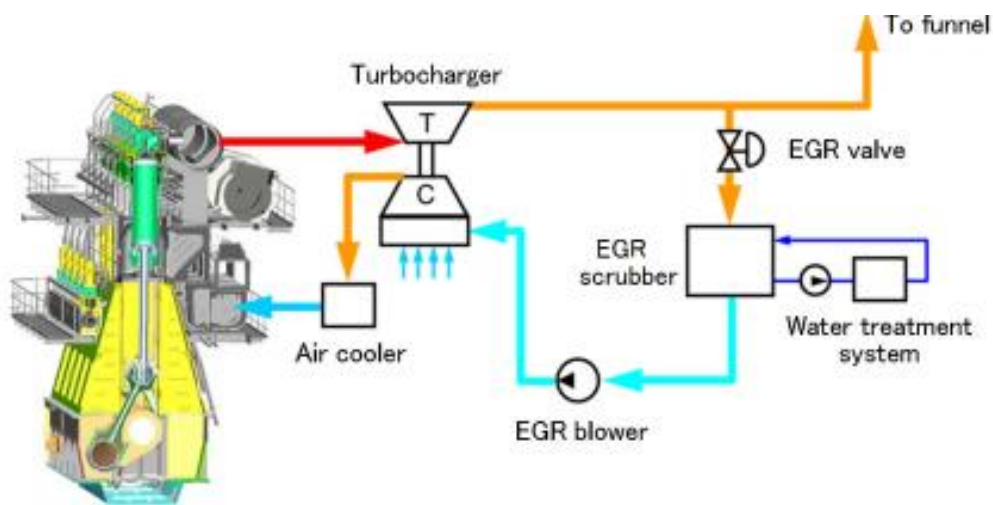


Figura 3.3 Sistema EGR.

Existen otros métodos o técnicas que no llevan a cabo en el interior del cilindro como hemos descrito anteriormente. Estos se conocen como medidas secundarias ya que actúan fuera del propio motor. Es posible reducir, o en este caso, limpiar las emisiones que se genera cuando los gases

salen del interior de los cilindros, hasta un 95% de las emisiones de  $\text{NO}_x$  son reducidas según la compañía *Yara Iberian*, que posee una gran oferta en diseño e instalación de sistemas SCR. Este método consiste en añadir amoníaco (o urea, en un formato conocido como *AdBlue*) a los gases de escape que se generan a través del motor, haciendo que reaccione con los óxidos de nitrógeno dando lugar a la aparición de nitrógeno y también vapor de agua.

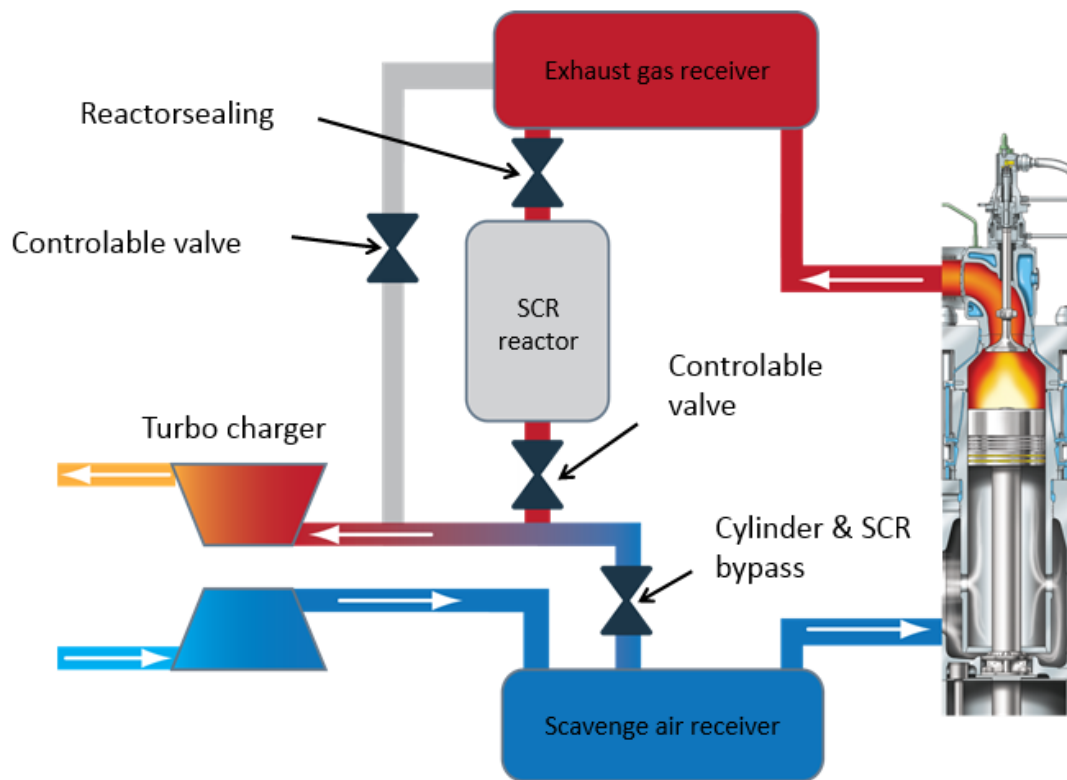


Figura 3.4 Sistema SCR.

El amoníaco tras vaporizarse se introduce, por medio de un distribuidor, en la corriente de gases que desprende el motor e inyectado



en el catalizador. Es el amoníaco quien reacciona con los óxidos de nitrógeno presentes en los gases y no el oxígeno, de ahí que se considere un sistema selectivo. Esta reacción química es acelerada mediante el uso de los catalizadores. Es el sistema más empleado a nivel industrial, y sobre todo en motores diésel marinos. [29]

# Capítulo 4

## *Propulsión híbrida*

### *Diésel-Eléctrica*

#### **Introducción.**

La primera vez que se habló de propulsión híbrida (diésel-eléctrica) en el sector naval fue en el ámbito militar durante la Segunda Guerra Mundial como medio de propulsión para submarinos. El petrolero ruso *Vandal*, fue un buque que contaba con un sistema de propulsión híbrido durante el año 1903 y posteriormente se implantó este tipo de propulsión en portaaviones. El primero de esos portaaviones fue el *USS Langley* perteneciente a Estados Unidos, le siguieron algunos trasatlánticos como el *Normandie* que contaba con

propulsión turbo eléctrica, así como algunos rompehielos que también hacían uso de estos motores híbridos. Sin embargo, estos sistemas sufrieron un decaimiento durante la década de los 70, debido principalmente al aumento del precio del combustible. Hoy en día los sistemas diésel eléctricos están en auge, aunque tuvieron que dar un giro a sus características iniciales para poder ser más eficientes como, por ejemplo, en la conversión de combustible que pudiera ser utilizado en las nuevas maquinarias. En la actualidad, su uso está más extendido en la náutica de recreo, en algunos catamaranes y buques de pasaje, pero a medida que aparecen nuevas tecnologías capaces de adaptarse a la nueva situación, cada vez son más los buques que implantan este sistema en sus plantas de propulsión. [30, 31]



*Figura 4.1 Buque SS Normandie.*

## **4.1 Propulsión diésel-eléctrica en buques.**

Los sistemas de propulsión eléctricos están basados en la obtención de un aumento de la propulsión con la ventaja de generar menos cantidad de emisiones nocivas a la atmósfera, todo esto con un consumo más reducido de combustible. Este es el objetivo fundamental de estos sistemas.

Los motores híbridos combinan la propulsión mecánica y eléctrica dentro de la cadena cinemática, obteniendo mayor eficiencia propulsora. De forma aproximada, el uso de los sistemas de propulsión diésel-eléctrica reduce un 20% menos de combustible, si lo comparamos con los motores convencionales.

Este tipo de propulsión tiene la peculiaridad de ofrecer un par elevado a baja velocidad que es proporcionado por un motor eléctrico, el cual aprovecha casi toda la energía eléctrica que recibe y la transforma en energía mecánica, lo que conlleva a un alto rendimiento. Además, estos sistemas poseen la ventaja de que son compactos, más seguros que los motores convencionales y producen un menor ruido, lo que lo hace muy atractivo dentro de los buques de pasaje y mercancías peligrosas. [32]

Actualmente, la propulsión híbrida cuenta con un sistema de electrónica de potencia que controla el generador de cola. De esta manera tanto el motor diésel y la hélice se sincronizan a una misma frecuencia, dando lugar a una mayor capacidad de operación del propio buque. La base de la propulsión híbrida se encuentra en los modos en los que el barco opera además de la propia demanda de velocidad y potencia que veremos más adelante.

Se puede diferenciar dos partes importantes dentro de los sistemas de propulsión híbrida, en primer lugar, el **bloque generador** y transformador de energía y, en segundo lugar, la **propulsión mediante un motor eléctrico**. Los diésel generadores son los encargados de dar alimentación a los cuadros y de ahí enviar la corriente hacia los transformadores de tensión y, posteriormente, a los convertidores de frecuencia. Las baterías suelen incluirse en este bloque a pesar de que no generan energía. [33, 34]

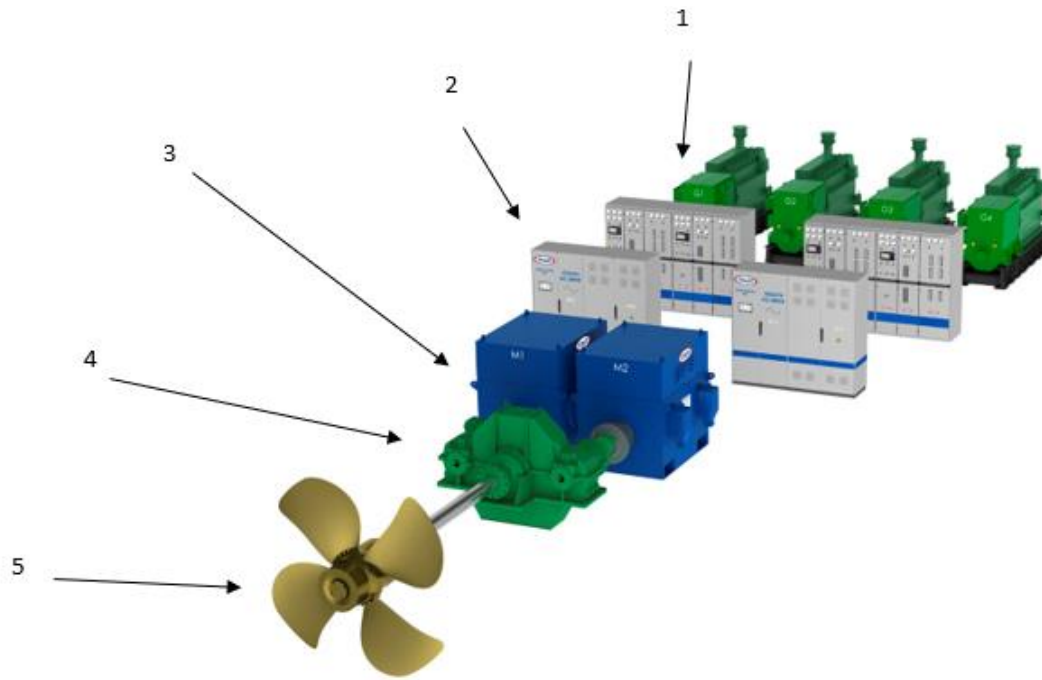


Figura 4.2 Planta de propulsión Diesel- Eléctrica en buques.

La planta propulsora consta de las siguientes partes:

1. Generadores.
2. Cuadro principal.
3. Transformadores de propulsión.
4. Convertidores de frecuencia.
5. Hélices propulsoras.

#### 4.2 Funcionamiento de una planta de propulsión híbrida.

A grandes rasgos el tipo de propulsión híbrida cuentan con dos fuentes de energía principales, por un lado, los motores y por otro los generadores principales en conjunto con las baterías. Su modo de

funcionamiento es el siguiente: en el momento de la marcha avante, los motores diésel hacen de generadores produciendo la corriente alterna que será utilizada para suministrar energía a los motores eléctricos síncronos propulsores. La parte más importante de este tipo de propulsión son los convertidores de frecuencias ya que adaptan la corriente al tipo de motor evitando pérdidas en el mismo. Esto lo que permite es un control efectivo de velocidad y del par motor. En estos sistemas, el motor propulsor genera el par requerido en el rango de velocidades desde cero hasta el máximo, incluso en marcha inversa, generando a su vez un impulso a la hélice mejorando la eficiencia del conjunto hélice- motor propulsor.

La gran ventaja de este sistema es precisamente la combinación de dos motores. El motor eléctrico apoya al motor de combustión con el objetivo que este último mantenga su punto de eficiencia óptimo debido a que el motor diésel trabajará de forma constante por lo que el consumo se reducirá notablemente. [35]

Otra de las características a tener en cuenta de estos sistemas, es que el motor y la hélice no están ligadas mecánicamente, por lo que es posible situar el motor en otro lugar indistintamente lo que conlleva a un mayor espacio para carga u otros equipos. Es preciso nombrar que el uso del diésel-eléctrico da lugar a que la potencia mecánica total a bordo del buque

se inferior ya que comparten las reservas de energía por lo que, durante el momento de arranque, los motores propulsores obtendrán energía sin consumir de la propia red eléctrica. Esto da lugar a que se reduzca también el número de motores diésel a bordo.

El generador utilizado en la propulsión híbrida es una máquina eléctrica rotativa cuya función es transformar la energía mecánica en energía eléctrica mediante el conjunto de sus componentes, es decir, el rotor y el estátor. En el momento del funcionamiento se produce un flujo magnético que se transforma en electricidad utilizada para cargar las baterías o para alimentar a los motores principales según el modo de funcionamiento en el que se encuentre.

### **4.3 Modos de funcionamiento**

Sabemos que el modo de funcionamiento va a depender del tipo de travesía en la que se encuentre navegando. De forma general existen tres modos de funcionamiento: el modo eléctrico, el modo diésel y el modo híbrido.



### Modo eléctrico.

Durante el modo totalmente eléctrico el buque obtiene el empuje propulsor gracias al grupo electrógeno que sustituye a los motores diésel, en este momento tanto el motor principal como el embrague de marcha atrás se encuentran inoperativos, utilizando en su ausencia el cojinete de empuje del embrague. De este modo se consigue que el generador funcione de forma variable reduciendo el combustible.

### Modo diésel.

Por el contrario, el modo diésel utiliza los motores de combustión, aunque el motor eléctrico sigue funcionando debido a que se encuentra conectado al eje de la hélice, la ventaja reside en que gracias a eso el motor eléctrico aporta energía al sistema eléctrico en el interior del buque mediante un generador de red, por lo que no entraría en funcionamiento el grupo electrógeno diésel.

### Modo híbrido.

Por último, el modo híbrido, en el que se combina ambos motores diésel y eléctrico. En este modo la potencia disponible es aprovechada para el impulso del buque. Se suele utilizar cuando se requiere velocidades superiores.

La ventaja de estos tres modos está en la posibilidad de intercambiarlos durante la navegación, facilitando el manejo del buque, mejorando la eficiencia, reduciendo combustible y evitando las emisiones nocivas a la atmósfera. Es necesario esta energía híbrida para optimizar al motor principal y posteriormente dar energía a las máquinas propulsoras para poder funcionar. A altas velocidades es el motor eléctrico quien produce la energía necesaria, evitando así que el motor de combustión aumente su carga térmica con lo que esto supone de cara al medio ambiente. [44]

#### 4.3.1 Modos PTO/PTI

Hay que diferenciar por otro lado, los modos de funcionamiento PTO y PTI dentro de la propulsión híbrida.

Durante el modo generador, o **modo PTO** (*Power Take Off*), el motor principal proporciona, además de la potencia propulsora requerida por el buque, la energía eléctrica necesaria para los consumidores del buque. Este modo permite una alta carga del motor principal, el cual funcionará con bajo consumo de combustible por lo que las emisiones también se reducen. Los grupos electrógenos se detienen cuando se encuentra en funcionamiento el modo PTO. Esto hace que los grupos no necesiten un

mantenimiento periódico ya que se apagan cuando no se están utilizando, alargando su vida útil.

El **modo PTI** (*Power Take In*), es seleccionado principalmente cuando se requiere altas velocidades. Junto con el motor principal, la maquina eléctrica funciona como un motor auxiliar el cual entrega apoyo a la hélice para el avance. En este caso los grupos electrógenos suministran la energía eléctrica necesaria tanto para la propulsión como para los consumidores del buques. Este modo, conocido como modo de refuerzo, aumenta principalmente la flexibilidad del sistema de propulsión cuando el buque se encuentra en carga máxima. [36]

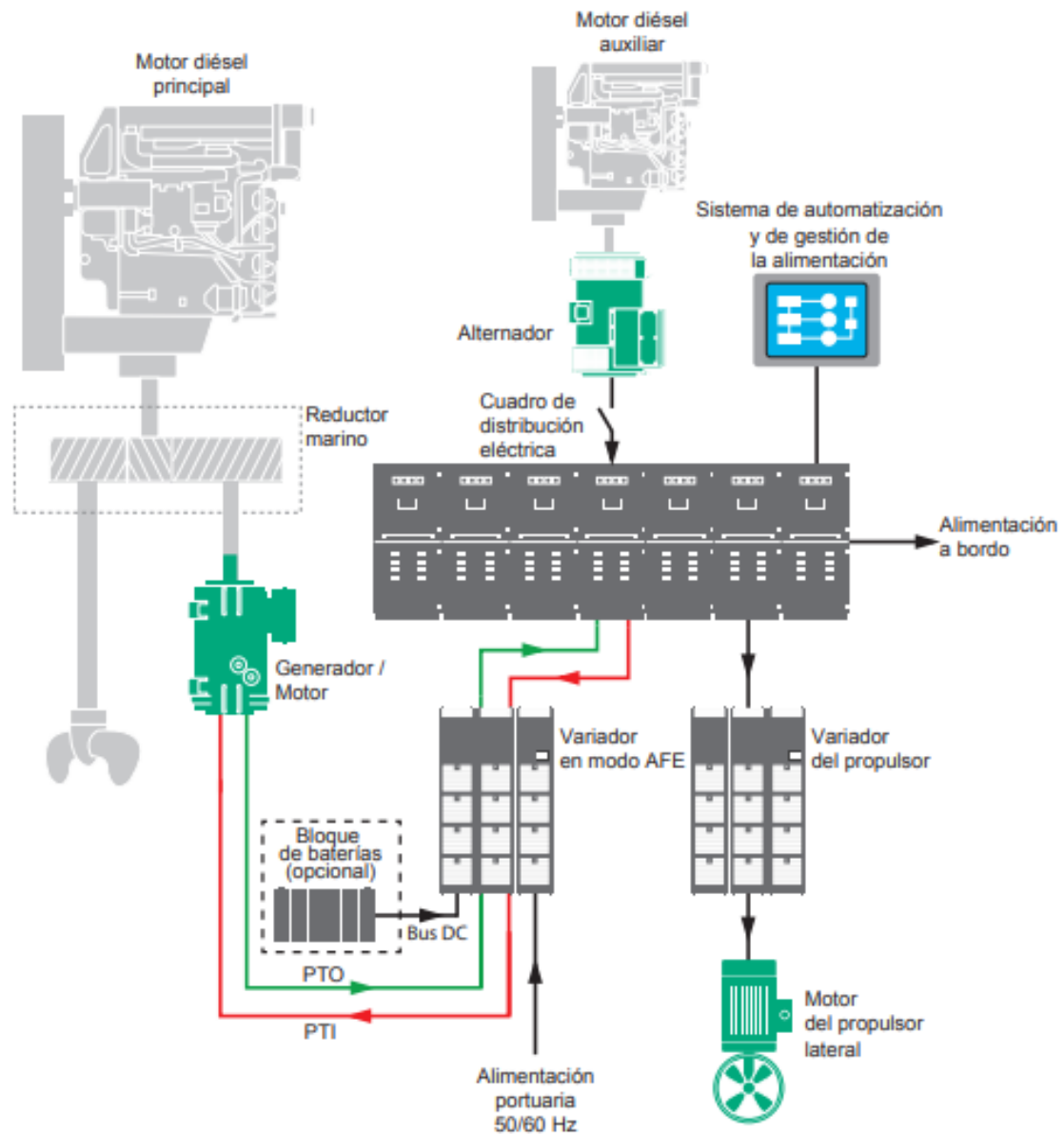


Figura 4.3 Esquema hibridación en los modos TPO/PTI. [48]

### Ventajas de los sistemas PTO/PTI:

El uso de estos sistemas híbridos proporciona una serie de ventajas durante su funcionamiento. Es posible destacar:

- Fácil combinación entre los distintos modos de operación.

- Menor consumo de combustible debido al menor tiempo de funcionamiento de los motores diésel.
- A baja velocidad mejor funcionamiento.
- Beneficioso para el medio ambiente.

#### **4.3.2 Modo híbrido**

Durante este modo, en el cual se combinan los dos modos vistos anteriormente, la máquina eléctrica se utiliza como alternador además de como motor de propulsión. Esto tiene la ventaja de que se puede hacer un uso flexible del motor principal y los grupos electrógenos. En el modo eléctrico PTI, la hélice se acciona a velocidad variable a través de un convertidor de frecuencia. Por el contrario, en modo PTO, el convertidor suministra un voltaje y una frecuencia fija al motor principal y al generador del eje, por lo que este podrá operar en un rango de entre 70 y 100% de rpm. De esta forma, la eficiencia de la hélice junto con el motor es máxima, ayudando a reducir las emisiones nocivas. [36]

Por otro lado, es posible distinguir dos configuraciones híbridas diferentes y más utilizada, la propulsión híbrida en **serie** y en **paralelo**.

#### 4.3.3 Propulsión Híbrida en Serie.

En este sistema, el motor eléctrico reemplaza al motor diésel convencional, alimentado por un parque de baterías. Este motor tiene como característica principal la de ofrecer un buen rendimiento, además de ser ligero y compacto. Sin embargo, no solo el motor debe ser eficiente, también debe ofrecer una gran autonomía en cuanto a baterías y ser fácilmente recargables para poder dar alimentación al motor eléctrico.

El funcionamiento cuando hacemos uso de la propulsión híbrida en serie varía entre un modo y otro. Cuando nos encontramos en el **modo totalmente eléctrico** el motor estará alimentado por baterías, son las encargadas de generar la energía, por un lado, para la propia propulsión del buque, y por otro, para los sistemas a bordo. Cuando estas baterías se descargan, es necesario que se mantenga la alimentación del motor principal, que en este caso es eléctrico, por lo que entra en funcionamiento en este momento el grupo electrógeno, que cargará también las baterías que disponga. El motor diésel y los

grupos de generación se encuentran fuera de operación, es decir, apagados. [37, 38]

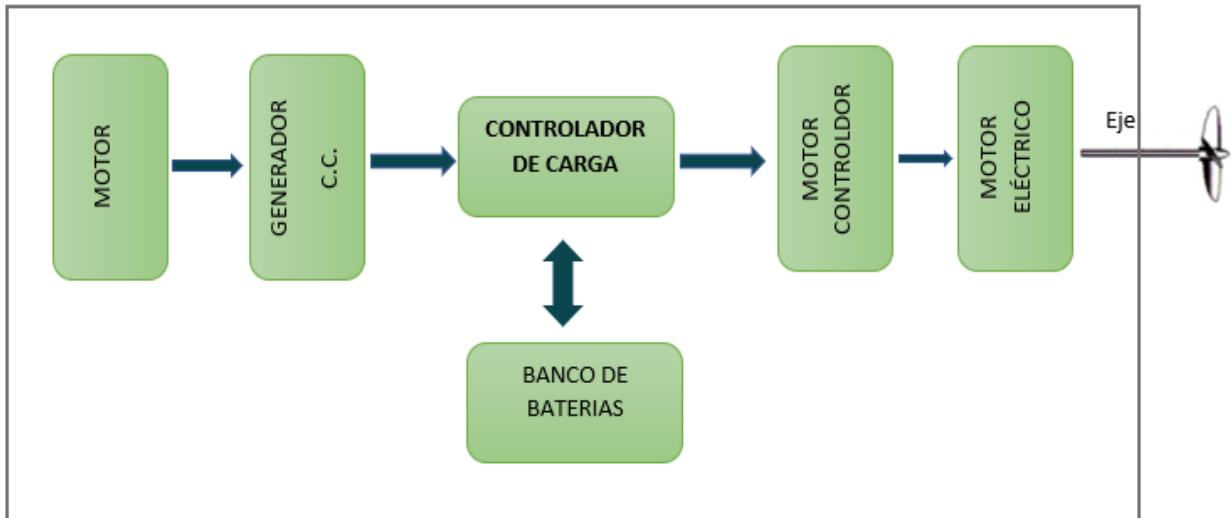


Figura 4.4 Sistema Híbrido en Serie.

#### 4.3.4 Propulsión Híbrida en Paralelo.

En este modo de propulsión, el motor diésel principal opera a carga parcial además de con una velocidad variable con el objetivo de hacer más efectiva la hélice. En este caso, el grupo electrógeno es sustituido por un motor térmico enganchado a una pequeña bobina que hace las veces de generador y produce, por un lado, la corriente y por otro la motorización eléctrica.

Las pilas son recargadas cuando el buque se encuentra en modo térmico, cuya alimentación se produce gracias al propio motor del barco

que recargará el parque de baterías. Una vez alimentado, se pasa al modo eléctrico, en el que se utiliza esa energía del interior de las baterías para alimentar al motor de propulsión.

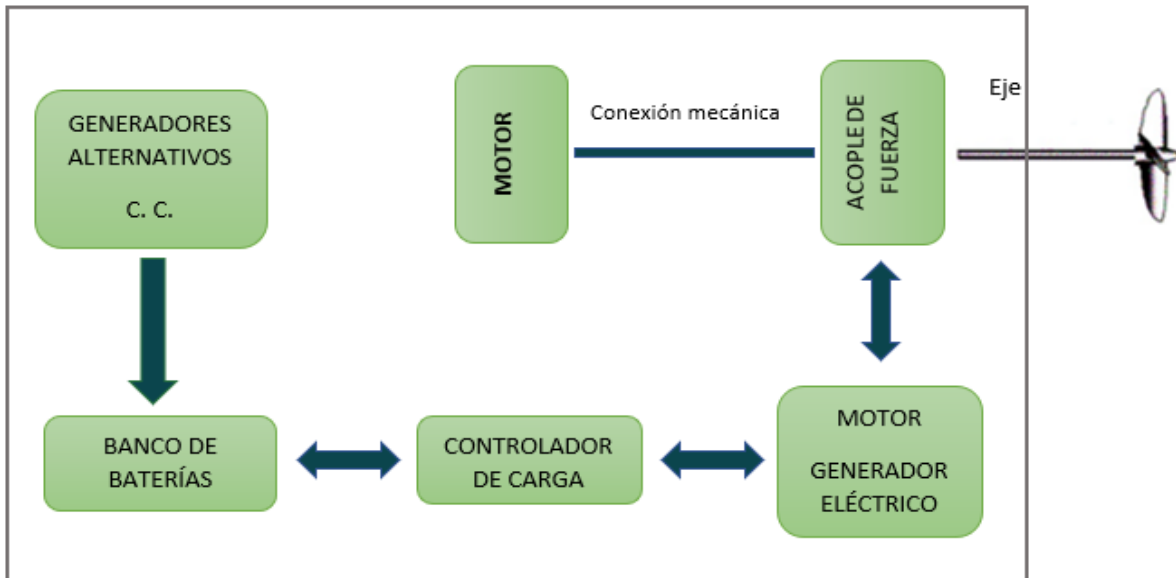


Figura 4.5 Sistema Híbrido en Paralelo.

Por otro lado, en el bloque propulsor, hoy en día se utilizan dos sistemas: el *POD* (o góndola direccionable) azimutal que aporta una maniobrabilidad mayor cuando se encuentra a velocidades bajas, por lo que el consumo también es menor; y el sistema propulsor directo a línea de ejes o reductor. [40]



#### 4.4 Propulsión Pod.

Hacia 1955, de la mano de F.W. Pleuger y Busman Friedrich aparece la propulsión azimutal con el fin de mejorar la maniobrabilidad de los buques. Este concepto azimutal engloba también un sistema de propulsión marina en la que las hélices tienen una configuración en *Pod*, dando lugar a una rotación de 360° de forma horizontal al eje vertical y sobre sí misma, por lo que no sería necesario el uso de timón o hélices transversales, siendo capaz este sistema de proporcionar el empuje lateral necesario para hacer girar el buque, lo que nos aporta una mayor maniobrabilidad. De este tipo de propulsión nos vamos a centrar en los apartados posteriores.

Estos *Pods*, son sistemas que disponen en su interior de un motor eléctrico de frecuencia variable conectado a la hélice mediante el eje. Por lo tanto, ambos sistemas, tanto el de propulsión como el sistema de dirección, se combinan y se convierten en una sola parte. De esta forma no es necesario el uso de timones o hélices transversales. El motor eléctrico, ubicado en el interior de las cápsulas o *Pod*, está controlado a través de un convertidor de frecuencia cuyo rango de velocidad oscila entre las 0 y 180 rpm. [41, 42]

Como sabemos, el sistema *azipod* (concepto desarrollado por la marca ABB para nombrar a estos sistemas de propulsión), es un sistema dentro de la propulsión eléctrica el cual engloba tres componentes principales:

- El transformador de suministro.
- El motor de propulsión.
- El convertidor de frecuencia.

El transformador se encarga de reducir el voltaje necesario para proporcionar al motor del interior de la cápsula, la potencia producida por los generadores, de unos 6600 kV.

Por otro lado, el motor de propulsión se utiliza para producir el empuje necesario para hacer girar una hélice de paso fijo y esto lo consigue a través del motor eléctrico. El convertidor de frecuencia, sin embargo, tiene la función de cambiar la frecuencia de la potencia que es suministrada con el objetivo de controlar la velocidad de rotación del motor según los requisitos establecidos. [43]

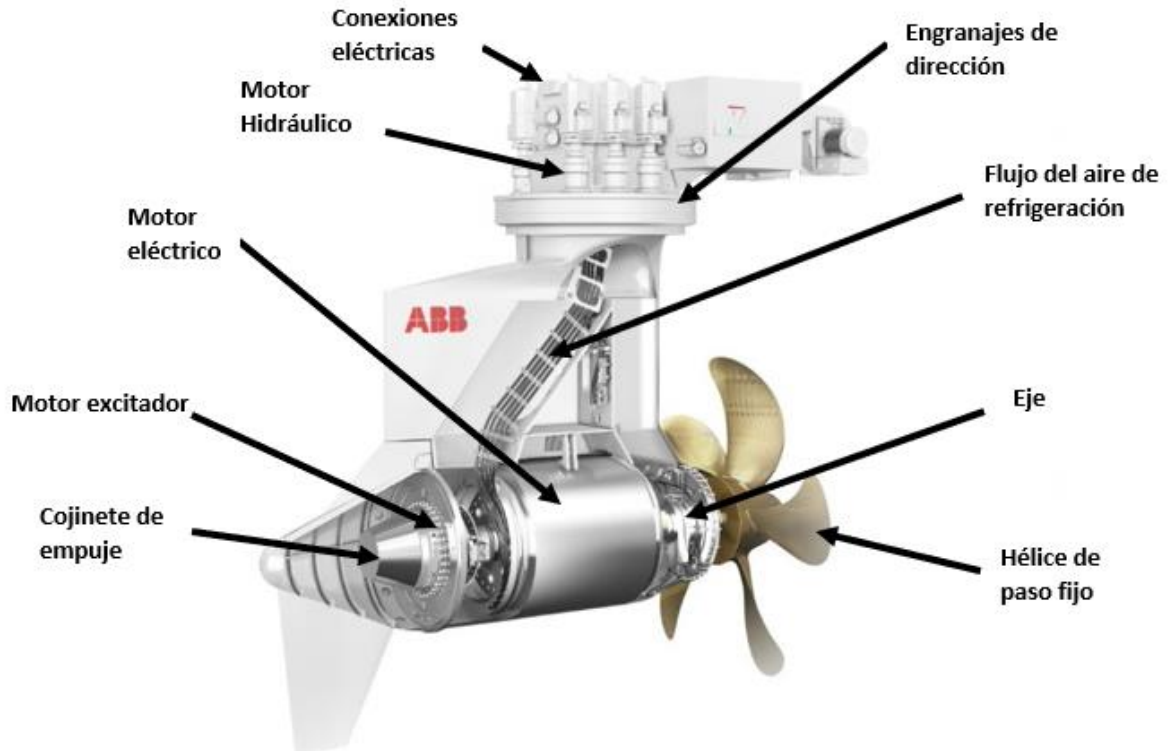


Figura 4.6 Sistema de propulsión Azipod ABB.

Otras características de estos sistemas son:

- Cuenta con un motor eléctrico de Corriente Alterna (en adelante AC), montado directamente en el eje de la hélice.
- El motor acciona una hélice de paso fijo (FPP<sup>5</sup>)
- Este sistema está controlado por un convertidor de frecuencia que convierte un voltaje de CA trifásico de frecuencia constante en un voltaje de CA trifásico con frecuencia variable. [44]

<sup>5</sup> FPP: Fix Pitch Propellers.

Ventajas de la utilización de los sistemas azipod:

Algunas de las ventajas que ofrece estos sistemas son:

- Una mayor maniobrabilidad debido a que las hélices pueden girar en todas las direcciones (360°), permitiendo entre otras ventajas, llevar a cabo una mayor distancia de parada en el caso de maniobras de colisión, además de producir empuje en cualquier dirección.
- En buques de grandes dimensiones, es posible utilizar dos o más azipod independientes entre sí para proporcionar una mejor maniobrabilidad.
- Ahorro de espacio en la sala de máquinas. Al no utilizar grandes motores, hélices o ejes, se ahorra mucho espacio que puede ser utilizado para almacenaje de carga.
- Este sistema proporciona una mayor eficiencia que en el caso de los sistemas convencionales, debido a que su disposición se encuentra por debajo de la altura del barco. El motor eléctrico que incorpora se encuentra montado directamente en el eje de la hélice dentro de la cápsula, la cual se encuentra sumergida debajo del casco del buque.
- Se elimina el uso del propulsor lateral ya que son los *Pods* los que van a proporcionar el empuje lateral.
- Disminuye el nivel de ruido y las vibraciones.
- Consumo más bajo de combustible y de aceite lubricante.

- Contribuye con el medio ambiente debido a su bajo nivel de emisiones.

Desventajas de los sistemas azipod:

Por el contrario, las desventajas de estos sistemas, aunque en menor medida son:

- El coste inicial de instalación de los sistemas Azipod es muy alto.
- Es necesario una gran cantidad de generadores diésel para la producción de energía.
- Aparece una limitación en la potencia producida por el motor, aproximadamente la potencia máxima se encuentra en 21 MW.
- No es posible la instalación de estos sistemas en grandes barcos con carga pesada que requieran mucha potencia y motores grandes. Sería necesario el uso de más *Pods* para poder llegar a conseguir la potencia requerida por este tipo de buques, lo que no parece ser muy viable en cuanto al coste. [43]

De forma general, el sistema de propulsión *Pod* cuenta con mayores ventajas que si lo comparamos con sistemas utilizados en otro tipo de propulsión convencional como, por ejemplo, la propulsión mecánica. Uno de los beneficios que más llama la atención, es quizás poder elegir la ubicación de la instalación de los generadores y distribuirla en lugares más reducidos, además de la maniobrabilidad que nos permite su utilización,

como nombrábamos anteriormente. Ventajas que se traducen en el uso de estos sistemas en buques de pequeño y mediano tamaño, aquel cuyo peso y dimensiones sean acorde para poder ser propulsado por una potencia máxima aproximada de 21 MW.

#### **4.4.1 Sistema eléctrico de los PODs.**

Para adentrarnos un poco más en la parte eléctrica de esos propulsores, vamos a desarrollar el sistema eléctrico en la propulsión *Pod*. Consiste principalmente en una planta de energía, transformadores, convertidores de frecuencia y como es de esperar, el motor de propulsión. Este motor se encuentra en el interior de la cápsula, mientras que el transformador y el convertidor de frecuencia se sitúan en la sala donde se encuentra los *Pods*.

Al principio, se utilizaban motores de corriente continua ya que eran más prácticos. Sin embargo, tras la aparición de los semiconductores en la industria, los variadores de velocidad para motores de CA se convirtieron en una opción viable, hasta el día de hoy que se siguen utilizando. Pero lo que produce una mejora en los motores eléctricos en la actualidad, son el desarrollo de nuevas tecnologías en convertidores de frecuencia ya que gracias a ellos es más fácil controlar

la velocidad de los motores, principio fundamental de este tipo de propulsión.

- **Transformador**

Es utilizado para repartir el nivel de voltaje y para elevar la tensión de generadores eléctricos entre otras aplicaciones. En los transformadores utilizados en las plantas de propulsión, su salida se ajusta a la etapa rectificadora de entrada del convertidor de frecuencia. La estructura básica de un transformador monofásico es de dos bobinas enrolladas alrededor de un material ferromagnético. Normalmente se encuentran conectados en estrella o triángulo.

Uno de los problemas que pueden ocasionarse es la distorsión armónica, común en los sistemas eléctricos. Es posible reducir su efecto mediante el aumento del número de pulsos en el convertidor de frecuencia, pero para ello el transformador debe ser adaptado a 6, 12 o 18 pulsos como se representa en la *figura 1.26*:

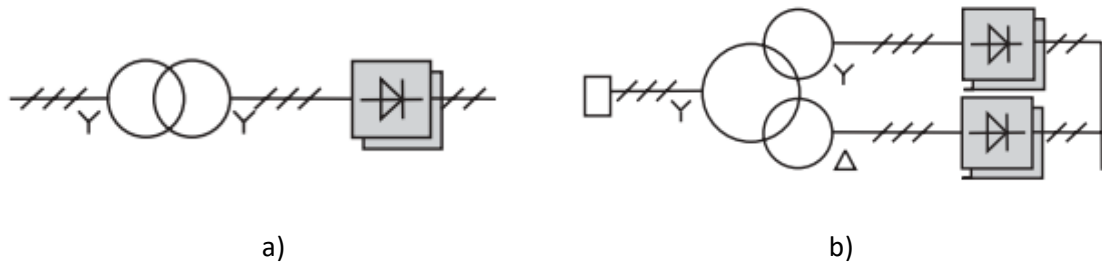


Figura 4.7 Transformador rectificador de 6 y 12 pulsos.

▪ **Convertidor de frecuencia**

Los convertidores de frecuencias utilizados normalmente en aplicaciones marinas son cicloconvertidores, el inversor conmutado en carga (LCI) y el inversor de fuente de voltaje (VSI). Figuras 1.21, 1.22, 1.23.

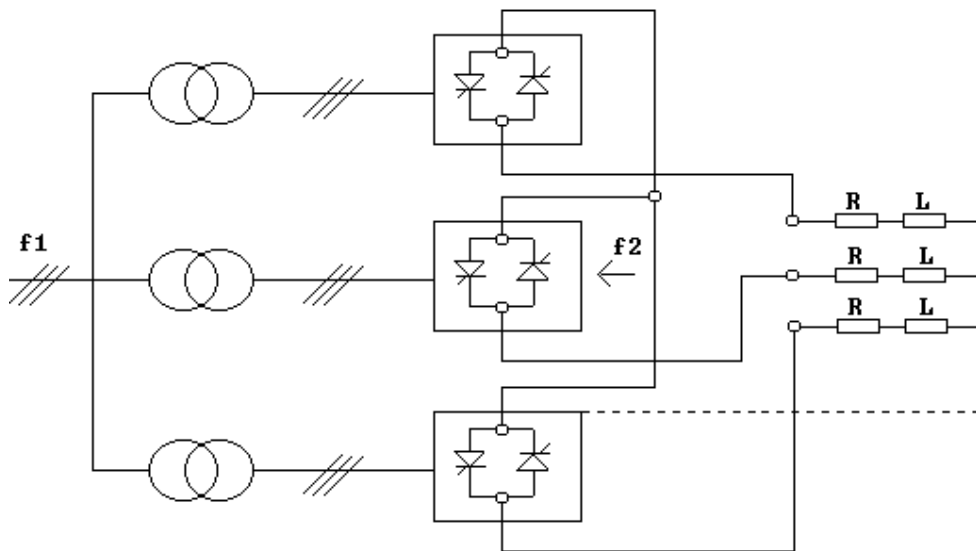


Figura 4.8 Esquema Cicloconvertidor.



El VSI se diferencia del cicloconvertidor y el inversor conmutado en que el primero cuenta con interruptores controlables en vez de tiristores. Esos interruptores se pueden encender y apagar, por lo que se puede controlar el voltaje de salida mediante la modulación de ancho de pulso (PWM). Sin embargo, los LCI y VSI tienen un diseño muy parecido, en primer lugar, cuentan con un diodo rectificador, un puente de corriente continua (en adelante DC) y un inversor para controlar la frecuencia.

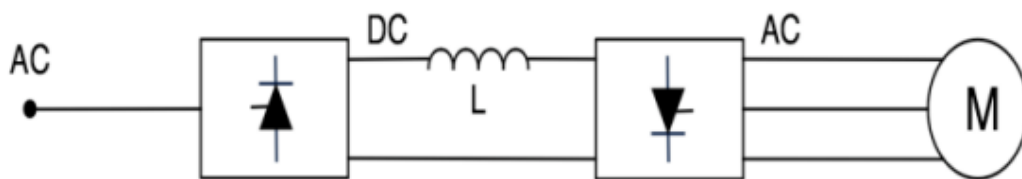


Figura 4.9 Esquema Inversor conmutado en carga (LCI).

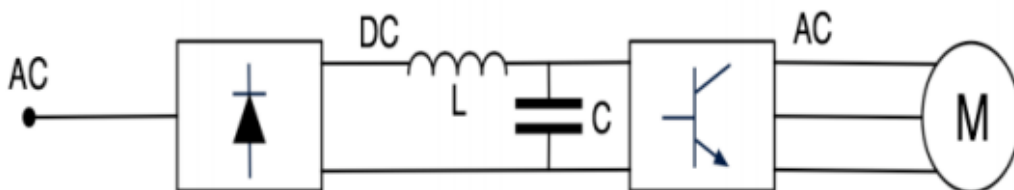


Figura 4.10 Esquema Inversor de Fuente de Voltaje (VSI).

La función de estos convertidores de frecuencia o inversores es la de controlar la velocidad y el par motor cambiando la frecuencia constante a frecuencia variable. Como se nombraba anteriormente, el desarrollo de semiconductores de nueva tecnología ha sido un papel fundamental en el desarrollo de estos convertidores de frecuencia ya que se reduce los posibles efectos no deseados que pudieran ocurrir, como pueden ser, las posibles pérdidas de energía o la distorsión armónica, la cual puede ocasionar daños en el sistema, producir interferencias haciendo que los equipos no funcionen con normalidad. Pero también nos ofrece múltiples ventajas como son las mejoras en el rendimiento de la potencia, la mayor capacidad de control y fiabilidad.

Los semiconductores pueden dividirse según tres categorías en función del grado de controlabilidad:

- **Diodos:** en donde los estados de apagado o encendido son controlados por el propio circuito de alimentación y no es posible el control externo. Tienen la función de rectificar al convertidor.
- **Tiristores:** los cuales se mantienen encendido a través de una señal de control y continúan en ese estado mientras les llegue la corriente.
- **Interruptores controlables:** es la señal de control la que gobierna el encendido y el apagado.

Estos dispositivos disipan mucha energía y podrían ocasionar daños en los componentes, por eso es necesario el uso de circuitos amortiguadores que absorben la energía del circuito de conmutación para evitar que se disipe en el interruptor.

▪ **Motor eléctrico**

Se trata de la parte más importante del sistema de propulsión eléctrica. Su función principal es la de convertir la energía eléctrica en energía mecánica. En el sistema de propulsión *Pod* se utilizan tres tipos de motores:

- Motores síncronos.
- Motores de imán permanente.
- Motores de inducción.

El motor que más se utiliza es el motor síncrono, debido principalmente su elevada eficiencia cuando se encuentra en el rango de alta potencia. Estos motores son denominados síncronos ya que el rotor trabaja a velocidad de sincronismo, es decir, gira a igual velocidad que la frecuencia de la red de corriente alterna mediante el cual está alimentado. El rotor es alimentado por corriente a través de un excitador

que lo hace conducir, dicho excitador se alimenta a su vez de un transformador de excitación que controla el voltaje.

El motor síncrono de imán permanente dispone de un imán en lugar de bobinados. En las últimas décadas se han desarrollado componentes que han hecho posible utilizar estos motores para potencias superiores, sin embargo, todavía hoy en día su uso continúa teniendo limitaciones cuando se requiere mayor potencia.

El motor de inducción es utilizado mayoritariamente en aplicaciones industriales debido a su sencillez a la hora de su construcción además de ser más robustos. Es utilizados en *Pods* de baja potencia.

|                    | <b>Motor Síncrono</b>           | <b>Motor Imán Permanente</b>                  | <b>Motor Inducción</b>           |
|--------------------|---------------------------------|---|----------------------------------|
| <b>Ventajas</b>    | Alta eficiencia a alta potencia | No hay pérdidas en el rotor, diseño compacto. | Construcción simple y robusta.   |
| <b>Desventajas</b> | Dificultades en la construcción | No disponible para potencias altas.           | Baja eficiencia a alta potencia. |

Tabla 4.1 Comparación motores eléctricos.

Algunas características importantes de estos motores utilizados en propulsión mediante *Pods* son: un buen factor de potencia, el poco peso y volumen con el que cuentan la mayoría de estos motores y por último la alta fiabilidad. Es necesario que el motor funcione a baja velocidad con un par y un rendimiento altos. [41, 45]

#### **4.5 Principales modelos y fabricantes híbridos.**

Muchos son los fabricantes que apuestan por este tipo de propulsión. Llamen la atención por su ligereza además de sus beneficios para el medio ambiente. La mayoría de estos fabricantes se centran en la náutica deportiva y en barcos de pequeño tamaño, sin embargo, cada vez son más los grandes buques que cuentan con estos sistemas.

Actualmente el mercado lo lidera la compañía ABB pioneros en este tipo de sistemas con una gran cantidad de sistemas *Pod*. ABB cuenta con dos tipos de propulsores *Pod* que dependen de la potencia generada, por un lado, los comprendidos en el rango de 5 MW a 30 MW y los que alcanzan entre 400 kW hasta 5 MW. Le siguen la marca *Mermaid* de Rolls- Royce con una potencia de entre 5 a 25 MW y se centran en la producción de la parte eléctrica de estos sistemas. ABB, sin

embargo, desarrolla todo el sistema en su conjunto. Le siguen otras compañías como el sistema *eSIPOD* de Siemens.

Dentro de la propulsión híbrida en paralelo, el astillero *Greenline* que trabaja también en España, es pionero desde hace diez años en el desarrollo de embarcaciones y desde hace unos años en la construcción de embarcaciones híbridas con un total de 370 buques híbridos en cuatro años. Ahorro de combustible, menos contaminación y mayor ligereza son algunas de las características que impulsan este mercado cada vez más demandado. [41]

Cabe destacar, que uno de los cruceros más conocidos y lujosos del mundo cuenta con este sistema de propulsión. El *Queen Mary 2*, es un buque construido en 2004 para la compañía *Cunard Line*, el cual cuenta con cuatro propulsores eléctricos, dos de ellos fijos y dos azimutales en forma de góndola con un peso de 260 toneladas del fabricante Rolls-Royce. Estos propulsores ofrecen una mayor maniobrabilidad y una velocidad máxima de 30 nudos y su consumo es de aproximadamente 21,5 MW. Están situados exteriormente al buque, por lo que, como se nombraba en apartados anteriores, libera espacio en el interior del barco. Fue sin duda, el uso de estos propulsores, el comienzo de este tipo de diseño que más adelante fueron incorporando

muchos de los cruceros y buques a lo largo de todo el mundo y en mucha compañías y fabricantes. [46, 47]

# Capítulo 5

## *Baterías*

### *Concepto y aplicaciones*

#### **Introducción.**

La gran parte de los dispositivos electrónicos de los que disponemos, cuentan con baterías ya sean de níquel, níquel-hierro, cadmio, entre otras. Estas baterías se agotan rápidamente y es necesario recargarlas. La revolución de la batería se encuentra en el hecho de poder almacenar la energía durante un tiempo determinado, lo que



provoca la viabilidad de que un acumulador pueda ser utilizado en multitud de aplicaciones en el ámbito marino para reducir el impacto de los combustibles fósiles, sin embargo, no todo es tan viable. Existen, por otro lado, las llamadas pilas de combustibles, elementos electroquímicos que no necesitan recargarse de forma constante y generan, además de electricidad, agua y calor en el momento en el que reaccionan un combustible junto con un oxidante dentro de una reacción electroquímica. Agua y calor que podrían ser utilizados para otros fines. Esta es la diferencia fundamental entre las baterías y las pilas de combustible, aunque como sabemos, comparten las características de que ambas transforman la energía química en eléctrica.



*Figura 5.1 Baterías eléctricas como medio de propulsión híbrido.*

En la actualidad las pilas de combustible han evolucionado y hoy en día existen diferentes tipos según los catalizadores que se utilizan, el electrolito empleado o el combustible usado y además con múltiples aplicaciones. Un invento revolucionario ya conocido, que está provocando la migración de los combustibles fósiles a las nuevas tecnologías basadas en las energías eléctricas.

En este capítulo, además de las baterías más comunes, conceptos básicos de las mismas y su implantación en los sistemas híbridos, vamos a establecer algunas de las características de las pilas de combustibles, ya que están relacionadas también de forma directa con los sistemas de propulsión híbrido y eléctrico, en particular en el ámbito marítimo.

## **5.1 Funcionamiento general de las baterías.**

Las baterías son dispositivos que actúan como acumuladores de electricidad, formadas por celdas electroquímicas que convierten la energía química que almacenan y la transforman en electricidad.

El funcionamiento de las baterías responde a un proceso conocido como oxidación-reducción, es decir, cuando un metal se oxida, lo que hace es ceder electrones ganando electrones el metal que se reduce.

Cada uno de esos dos metales se les conoce como cátodo y ánodo respectivamente. Entre esos dos metales o placas, se encuentra el electrolito y tiene la función de captar todos los electrones debido a los iones que posee.

La batería se descarga en el momento en el que el metal que se oxida llega a su límite de oxidación, momento en el que debemos recargar la batería. Es en ese momento de la recarga cuando se invierte la oxidación y los electrones regresan al metal de partida. Este proceso de carga y descarga con el paso del tiempo daña las baterías ya que el calor que se desprende va a modificar su estructura interna dando lugar a imperfecciones en el metal las cuales influyen en la circulación de electrones. [49]

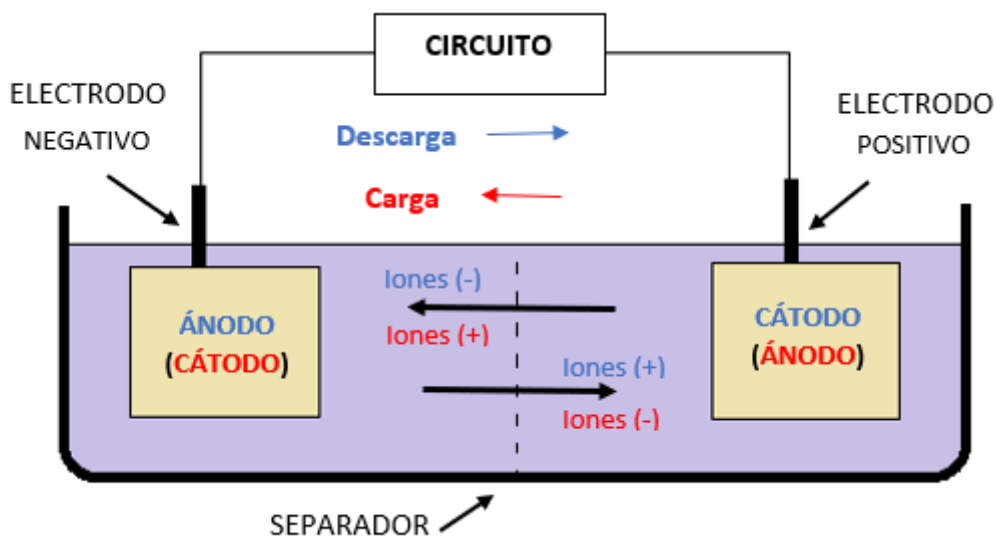


Figura 5.2 Elementos básicos de una batería recargable.

### 5.1.1 Principales conceptos de baterías.

Alguno de los conceptos y parámetros más utilizados a lo largo de este capítulo en relación con las baterías tanto en estructura como en funcionamiento son los siguientes:

- Electrodo: placa en la que se encuentran los electrones durante la reacción oxidación-reducción. El electrodo negativo será el ánodo y es donde tendrá lugar la oxidación en el momento de la descarga. Mientras que el electrodo positivo, o cátodo, es el lugar donde se produce la reducción durante la descarga.
- Electrolito: conductor iónico que se encuentra entre los electrodos (ánodo y cátodo). Está formado por un polímero conductor o una disolución acuosa o no acuosa.
- Separador: proporciona el aislamiento eléctrico entre el ánodo y el cátodo para evitar cortocircuitos entre los electrodos permitiendo la circulación de iones en el electrolito.
- Capacidad de almacenamiento de una batería: se trata del tiempo en el que la corriente es consumida antes de que la batería se descargue, es decir, la cantidad de electricidad que puede almacenar para

posteriormente descargar. La unidad que se utiliza para la capacidad de una batería es el amperio/hora (Ah)<sup>6</sup>.

- Profundidad de descarga: se trata del porcentaje de la capacidad total de la batería utilizada durante un ciclo de carga o un ciclo de descarga.
- Capacidad nominal: capacidad que entrega la batería desde que se encuentra totalmente cargada hasta que llega a una tensión de descarga determinada.
- Autodescarga: es la pérdida de capacidad de una batería en circuito abierto.
- Densidad de energía: energía almacenada en la batería por unidad de volumen (Wh/l).
- Densidad de potencia: potencia que es capaz de entregar la batería por unidad de volumen (W/l).
- Voltaje o tensión en circuito cerrado: tensión que obtenemos en los terminales cuando conectamos una batería a una carga.
- Resistencia interna: se trata de una resistencia orientativa no real que tienen las baterías internamente debido a que los elementos que la

---

<sup>6</sup> **Amperio/hora (Ah)**: cantidad de carga eléctrica que fluye por una batería cuando suministra una corriente de 1 amperio durante 1 hora.

componen no son conductores perfectos. La resistencia interna normalmente aumenta a medida que la batería se descarga.

- Curvas de carga y descarga: definen el funcionamiento de una batería a través de unos gráficos. Determina la capacidad práctica de la batería, es decir la capacidad disponible para el sistema desde la máxima carga (al máximo voltaje) hasta la descarga de la batería (voltaje mínimo).
- Ciclo de vida: número de ciclos de carga y descarga de una batería hasta que su capacidad alcance el 80% de su valor nominal. [50]

### 5.1.2 Clasificación de las baterías.

De forma general las baterías se clasifican en dos grandes grupos:

Baterías primarias: no recargables.

- Baterías de: zinc/carbono, zinc/dióxido de manganeso (alcalinas), óxido de mercurio, zinc/aire, óxido de plata, litio, entre otras.

Baterías secundarias: recargables.

- Baterías de: níquel/cadmio, níquel/hidruro, ion-litio, plomo. [51]

## **5.2 Baterías recargables.**

Cuando hablamos de baterías recargables (o baterías secundarias), podemos englobar a las baterías de níquel, las de níquel-cadmio, las de cadmio, entre otras. Todas estas pilas o baterías tienen en común que en su interior se produce una reacción electroquímica reversible que genera energía eléctrica. Esa energía eléctrica proviene de la combinación de elementos químicos dando como resultado otros compuestos que generan a su vez partículas cargadas positiva o negativamente, es decir, iones y electrones respectivamente. Antiguamente con el uso de las pilas alcalinas, el problema que se planteaba era el no poder ser recargadas (baterías primarias), es decir, contaban con reacciones no reversibles, por lo que su uso era muy limitado y su impacto ambiental muy grande. Con el uso de las pilas recargables, es posible volver a reutilizar las baterías pudiendo utilizarse en multitud de aplicaciones.

### **5.2.1 Baterías de plomo ácido.**

Las baterías de plomo ácido están formadas por un electrodo positivo de óxido de plomo y un electrodo negativo de plomo. Contienen

en su interior un electrolito de ácido sulfúrico y agua destilada, de ahí que se consideran baterías de plomo-ácido. También cuentan con un separador. El conjunto de todos estos elementos es lo que conocemos como celda.

➤ Funcionamiento:

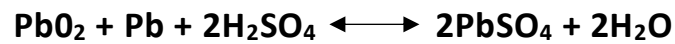
Estas baterías se basan en un proceso electroquímico en el que se producen dos conversiones de energía, una durante la carga, transformándose la energía eléctrica en energía química; y la otra durante la descarga, en la que la energía química vuelve a convertirse en energía eléctrica.

En el momento en el que la batería está en plena carga, el cátodo, (electrodo positivo), contiene óxido de plomo y el ánodo (electrodo negativo), plomo en su interior. Durante este proceso el plomo se forma y el dióxido de plomo aparece en las placas. Cuando se produce la descarga, la reacción que se produce en el electrolito, contraria a la que se produce durante la carga, conlleva a que tanto en el cátodo como en el ánodo aparezca sulfato de plomo debido a que la corriente circula por el electrolito haciendo que los cationes de hidrógeno se unan al oxígeno del dióxido de plomo dando lugar a la formación de agua. En ese momento quedan libres los iones de sulfato para poder reaccionar con



el plomo y formar así el sulfato de plomo. Todo este proceso se traduce finalmente en que la energía química del interior pase a transformarse en energía eléctrica.

Reacción que se produce en la batería:



Ventajas:

- Coste inferior.
- Se trata de una tecnología conocida en el mercado durante años.
- Funcionamiento óptimo a bajas y altas temperaturas.
- Celdas de voltaje elevado.

Desventajas:

- Cuentan con una energía y potencia específica relativamente baja.
- Poseen ciclo de vida corto.
- Requieren de un elevado mantenimiento.
- Son contaminantes debido al plomo y al ácido sulfúrico. [52]

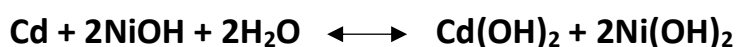
### 5.2.2 Baterías de Níquel-Cadmio.

Las pilas de Níquel-Cadmio cuentan con un cátodo de hidróxido de níquel, un ánodo de un compuesto de cadmio separadas por un electrolito de hidróxido de potasio, elementos que permiten que la pila sea recargable. Se trata de baterías alcalinas las cuales están basadas en el uso de una solución acuosa básica como electrolito.

Estas baterías pueden estar sometidas a sobrecargas, sin embargo, la carga no es almacenada una vez que ha llegado a su máximo nivel, por lo que pueden ser recargadas multitud de veces. Las baterías NiCd pueden ser almacenadas en temperaturas entre los  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $+50^{\circ}\text{C}$ . Además, cuentan con una densidad energética de  $50 \text{ Wh/Kg}$ , por lo que resultan más baratas, más ligeras y de mayor durabilidad.

Varias son las reacciones producidas en el interior de las pilas de Níquel-Cadmio, según el electrodo negativo o ánodo, o del positivo o cátodo.

La reacción total que se produce es la siguiente:



La carga de las baterías se produce hacia el lado izquierdo y la descarga hacia el derecho de la reacción. Como sabemos, el electrolito contiene hidróxido de potasio, sin embargo, la concentración apenas varía cuando se produce la reacción ya que no actúa directamente en la misma, provocando que la propia tensión de la batería permanezca sin cambios en los momentos de descarga. [52]

#### Ventajas:

- Se pueden recargar.
- Resistencia interna muy baja.
- Tensión constante durante el ciclo de descarga.
- Menos posibilidad de perder electrolito debido a que son más robustas.
- Funcionan a altas temperaturas.
- Larga vida útil.

#### Desventajas:

- Posee una tensión menor (1,2V) en comparación con las pilas convencionales (1,5V).
- No es posible cargar las baterías a tensión constante ya que puede suponer el calentamiento de la pila.

- Son más costosas que el resto de las baterías.
- El uso del cadmio es altamente tóxico. [53, 54]

### **5.2.3 Baterías Níquel-Hidruro Metálico.**

Por otro lado, es preciso hacer hincapié en las baterías de Níquel-Hidruro Metálico debido a que su utilización ha ido creciendo en los últimos años, sobre todo tras la entrada en vigor del Real Decreto 106/2008 sobre el uso de las pilas y acumuladores y de la gestión ambiental de sus residuos, mediante la cual el uso de cadmio fue restringido a partir de febrero de ese mismo año.

Estas baterías están formadas por un electrodo positivo, generalmente hidróxido de níquel, y un electrodo negativo cuyo material suele ser hidruro metálico o aleaciones de hidrógeno. También cuenta con un electrolito de hidróxido de potasio el cual transfiere los iones desde el electrodo positivo al negativo. La diferencia fundamental, además del tipo de electrolito utilizado es precisamente que contienen cadmio, por lo que los efectos negativos de su uso son eliminados.

Algunas de las características más importantes son: su tensión nominal por celda que se encuentra en 1,2 V, además cuenta con mayor

densidad de carga que las baterías de NiCd y su uso está implementado en la propulsión híbrida de vehículos no enchufables ya que pueden acumular el doble de energía que otras baterías como las de plomo ácido.

Por tanto, las ventajas de este tipo de baterías son:

- Poseen mayor capacidad y autonomía que las baterías de Níquel-Cadmio.
- Durabilidad del tiempo de recarga entre medio y alto dependiendo de la potencia de las baterías.
- Posee una alta potencia específica (más de 200 W/Kg) y elevada densidad de energía (más de 150 W/l)
- Su densidad energética es mayor y se encuentra entre 60 y 80 Wh/Kg.
- Menos contaminando debido a que no contiene cadmio.

Algunas desventajas son:

- A su funcionamiento le afecta las temperaturas extremas, ya sea frío o calor.
- Más costosas que las baterías Níquel-Cadmio.
- Las cargas y descargas constantes van a afectar a la durabilidad y fiabilidad de este tipo de baterías. Por lo que el número de ciclos va a ser menor que en el caso de otras baterías (entre 300 y 600).

- No se encuentran en el mercado en grandes cantidades. [52, 55]

#### 5.2.4 Baterías de Ion-litio.

Estas baterías se encuentran a la cabeza en cuanto a rendimiento con respecto a las baterías convencionales, también es preciso nombrar que son una tecnología muy reciente con perspectivas de futuro muy prometedoras sobre todo en el ámbito de la tecnología eléctrica en vehículos.

Las baterías de Ion-Litio cuentan con una alta densidad energética con reducido tamaño y peso. Están formados por un cátodo de litio metal (litio-cobalto o litio-hierro) y un ánodo de un compuesto carbonoso generalmente grafito. Ambos están inmersos en un electrolito, formado por disolventes orgánicos para permitir el transporte de iones en el interior, en el cual se encuentra la lámina que va a separar los electrodos (ánodo y cátodo).

##### ➤ Funcionamiento:

Las baterías de Ion-Litio están basadas en un proceso de inserción-desinserción de iones, siendo estos los que circulan acercándose o alejándose de los electrodos. En el momento de la descarga, los iones vuelven desde el ánodo hasta el cátodo por medio del electrolito utilizando el circuito exterior. La carga se produce cuando los iones de litio fluyen del

electrodo positivo al negativo por medio del electrolito. Al finalizar ese flujo de electrones se completará la carga, por lo que la batería estará totalmente cargada en el momento en el que los iones de litio se establecen en el electrodo positivo. [57]

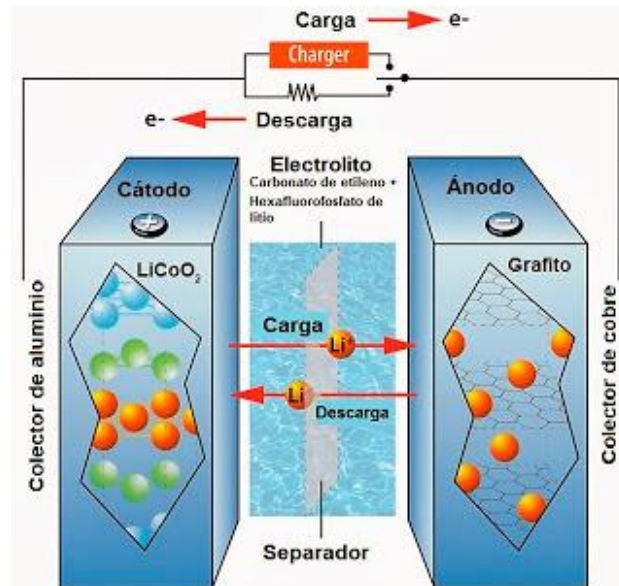


Figura 5.3 Funcionamiento de una batería ion litio. [56]

### Ventajas:

- Mayor densidad energética.
- Energía específica elevada entre los 80 y 170 Wh/Kg.
- Alto voltaje de la celda.
- Muy buen ciclado de carga y descarga.
- Voltaje nominal elevado entre los 3 y 4 V.
- Reducido impacto ambiental ya que no posee contaminantes debido a que no utiliza metales pesado para su fabricación.

Desventajas:

- Más costoso.
- Necesidad de un sistema electrónico de control para la limitación de la carga y descarga.
- Su funcionamiento no es óptimo a altas temperaturas. [58, 59]

**5.3 Comparativa entre los distintos tipos de baterías:**

Algunas de las características más destacadas de las baterías se recogen en la tabla 5.1:

| Tipo de batería | Energía Específica (Wh/Kg) | Densidad Energética (Wh/Kg) | Potencia Específica (W/Kg) | Ciclo de Vida (Horas) | Eficiencia energética (%) |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Ni-Cd           | 219                        | 20-40                       | 200                        | 2000                  | 50-95                     |
| Ni-MH           | 240                        | 20-60                       | 250                        | 600                   | 70-90                     |
| Ni-Zn           | 55                         | 50                          | 100                        | 2000                  | 60                        |
| Li-ion          | 100                        | 50-250                      | 50-2000                    | 400-9000              | 85-99                     |
| Plomo Ácido     | 33                         | 30                          | 130                        | 400                   | 65                        |

Tabla 5.1 Densidad energética en función del tipo de batería. (Fuente: IBM)



Las baterías de Ion-Litio son las que actualmente cuentan con una mayor influencia en la propulsión híbrida naval, debido a sus principales características, como hemos visto, su alto rendimiento y sobre todo su fiabilidad, además de que pueden recargarse en poco tiempo. Estas baterías ofrecen una mayor densidad energética en comparación con otro tipo de sistema de almacenamiento de energía como pueden ser los ultracondensadores o los volantes de inercia. Cuentan con una adecuada densidad de potencia junto con una alta eficiencia y larga vida útil. Si bien han ocurrido accidentes en relación con las baterías de ion-litio tanto en buques como en vehículos o aviones, siguen siendo las más utilizadas en el mercado actual. En la actualidad, la mayor parte de los buques utilizan combustible diésel marino cuya densidad energética se encuentra en torno a los 42190 kJ/Kg mientras que la mejor batería del mercado dispone de una densidad energética de 1224 kJ/Kg, lo que hace pensar que son muy poco competitivas, sin embargo, el factor clave es la reducción de emisiones enviadas a la atmósfera, con lo que el diésel no puede competir.

Los principales inconvenientes que se plantean son, por un lado, las baterías actuales tienen un ciclo de vida limitado, entre 5 y 10 años lo que supone tener que reemplazarla varias veces durante la vida útil de un barco, reemplazo que supondrá un coste una vez hayan dejado atrás su vida útil.

Por otro lado, la necesidad de una infraestructura en tierra para poder recargar el parque de baterías de forma rápida y eficiente, con el coste de electricidad consumida de la red local que supone su utilización.

[60]

#### 5.4 Autonomía a bordo.

El cálculo de la autonomía que una embarcación podría desarrollar con el uso de baterías a bordo estará estimado con la siguiente relación:

$$\text{Autonomía (horas)} = \frac{\text{Capacidad } \left(\frac{\text{amperios}}{\text{horas}}\right)}{\text{Corriente consumida (amperios)}}$$

Ahora bien, es necesario conocer algunos parámetros que van a influir en la autonomía y también en la corriente consumida, la cual se encuentra muy ligada a la velocidad a la que vaya el buque.

Existe un caso de estudio, publicado en la revista *MAN Energy Solutions*, con el nombre de “Baterías a bordo de buques transoceánicos”, de una embarcación que cuenta con dos propulsores de 750 kW. Las baterías, en este caso, deben ser capaces de suministrar 1500 kW suponiendo que los propulsores operan durante aproximadamente 10 minutos en el momento de la maniobra de llegada

a puerto. Es posible calcular la capacidad mínima de las baterías en función de las Tasas C<sup>7</sup> según el siguiente procedimiento.

$$1500 [kW] \times \frac{10}{60} [h] = 250 kWh$$

$$\frac{Potencia}{Capacidad} = \frac{1500}{250} = 6$$

De esa manera se obtiene el valor de la Tasa C, en este caso 6C. Lo que nos dice que la batería se encuentra en el límite de larga duración. Para evitar esto lo que se hace es aumenta la capacidad de la batería, de esta manera la tasa C disminuirá y la vida útil se podrá prolongar. De forma aproximada la tasa C de 3 normalmente se establece para baterías de alta potencia correspondiente en este caso a una capacidad de la batería de 500 kWh. Un ejemplo de cómo varían las tasas aparece en la *Tabla 5.2* a continuación.

---

<sup>7</sup> **Tasas C:** tasas de carga y descarga de una batería que entrega el fabricante en condiciones ideales.

| Tasa C | Tiempo     |
|--------|------------|
| 5C     | 12 minutos |
| 2C     | 30 minutos |
| 1C     | 1 hora     |
| 0.5C   | 2 horas    |
| 0.2C   | 5 horas    |
| 0.1C   | 10 horas   |
| 0.05C  | 20 horas   |

Tabla 5.2 Tasas C

Para otro caso en concreto de un ferry que es recargado durante la noche y opera durante el día sin cargas intermedias, se estima que el consumo de energía en puerto sea de unos 100 kW, si este trabaja durante 10 horas al día, la capacidad que se requiere es de 1000 kWh. Si vamos a la tabla correspondiente a las Tasas C, nos da el valor de 0,1C (100/1000). En este caso, se obtendrá una autonomía de aproximadamente 10 horas.

Hay que tener en cuenta, por tanto, que el consumo de energía viene determinado, tanto por los requerimientos energéticos en puerto, como para poder navegar en alta mar cuando la velocidad del buque es superior. [78]

## 5.5 Pilas de combustible.

Las pilas de combustible son sistemas electroquímicos que transforman de forma directa la energía química en energía eléctrica. Su utilización está llena de ventajas, sobre todo medioambientales, pero también a nivel de propulsión. Estas pilas producen mayor energía que con una combustión tradicional utilizando la misma cantidad de combustible, además del aprovechamiento directo del calor generado.

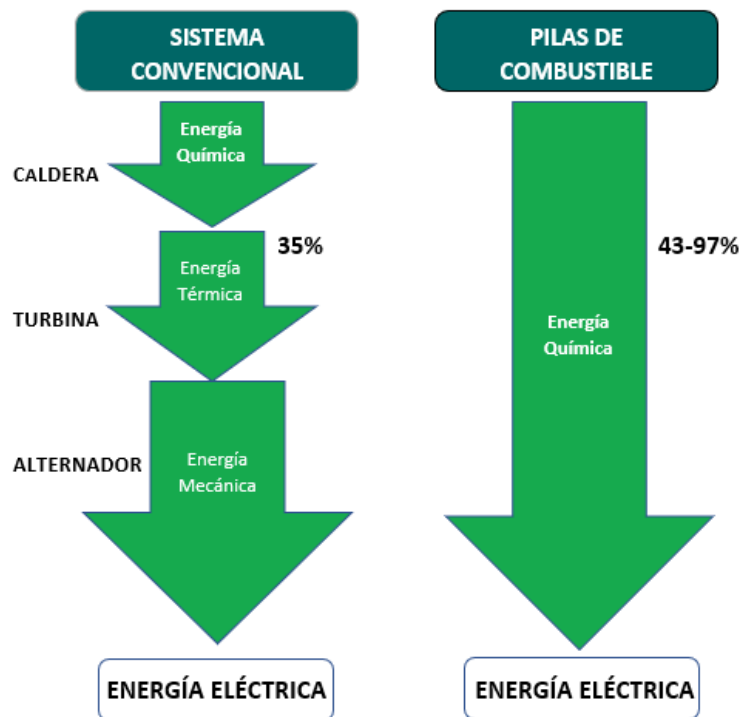


Figura 5.4 Diferencias en rendimiento. Sistema convencional y pilas de combustible.

En el caso de los motores diésel marino, el rendimiento apenas alcanza un 40%, mientras que, en las pilas de combustible, es posible

alcanzar un rendimiento teórico de 94,5% máximo. Hasta ahora se ha conseguido un rendimiento práctico de aproximadamente un 60% en pilas de combustible construidas, es el reto al que se enfrentan los investigadores, el desarrollo de unas pilas de combustibles que se ajusten al valor teórico y que cada vez sean más eficientes. [61, 62]

Otra serie de ventajas son, por un lado, que admiten varios combustibles además del más utilizado como es el hidrógeno, del que haremos mención en particular más adelante. El uso del gas natural, o el metano son otras de las opciones. Por otro lado, las pilas de combustible cuentan con altas densidades energéticas y que cada vez se desarrollan tecnologías capaces de aumentar su capacidad. Hay que destacar también la seguridad energética que nos proporciona el uso de estos sistemas evitando el uso del petróleo y los combustibles fósiles, además de que no depende de la red eléctrica para su funcionamiento, por lo que nos da cierta ventaja en el momento de que se produzca algún fallo en la red.

➤ Funcionamiento

Las pilas de combustibles están formadas por un ánodo como electrodo negativo y un cátodo como el positivo. En el interior de estos

elementos (electrodos), es donde se producen las reacciones químicas, las cuales son aceleradas a través de un catalizador que recubre a los electrodos. Estas celdas necesitan oxígeno y un combustible, en nuestro caso, el más que se utiliza es el hidrógeno, el cual, combinado con el propio oxígeno, es capaz de producir agua y electricidad. Para ello, el hidrógeno ingresa en el interior de la pila a través del ánodo disociándose en electrones e iones de hidrógeno. Estos últimos atraviesan el electrolito y llegan al cátodo, mientras que los electrones del ánodo pasan, mediante un circuito exterior, a desembocar en el cátodo donde van a reaccionar tanto con los iones como con el oxígeno para generar, como se indicó anteriormente, agua. [63]

Por tanto, a modo de resumen, es posible diferenciar, por un lado, los electrodos (ánodo y cátodo), el ánodo donde el hidrógeno se reduce para dar lugar a la formación de dos protones de  $H^+$  y el cátodo, donde reaccionan los protones y el oxígeno. Es en el electrodo donde se producen las reacciones químicas. Por otro lado, están los electrolitos, que permiten que los iones de  $H^+$  se incorporen al cátodo haciendo que se separen. Además, el electrolito es capaz de separar también los electrones. Y, por último, las placas bipolares que hacen de separador de celdas para la conducción de los gases y expulsión del agua.

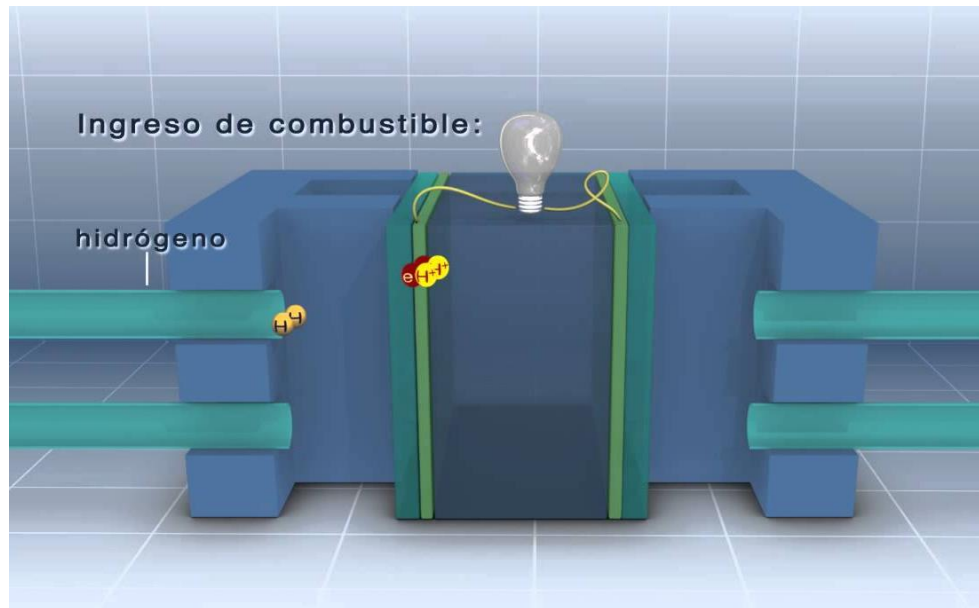


Figura 5.6 Funcionamiento pila de combustible.

## 5.6 Clasificación de las pilas de combustibles

Podemos clasificar las pilas de combustibles en muchos tipos atendiendo a diferentes consideraciones. A continuación, se muestra una tabla en la que se recogen los tipos de pilas de combustibles más utilizados en función del electrolito utilizado. Aparece su composición, ventajas, así como sus aplicaciones en todos los ámbitos de la industria.



|                                   | PEMFC   | DMFC                                   | AFC   | PAFC                              | MCFC                              | SOFC                                   |
|-----------------------------------|---|--|---|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| <b>Rango Potencia</b>             | 5-250 kW  | 5 kW                                   | 5-150 kW  | 50 kW-11 MW                       | 100 kW- 2 MW                      | 100 –250 kW                            |
| <b>Temperatura operación (°C)</b> | 60-100  | 5-120                                  | 90-100  | 175-200                           | 600-1000                          | 600-1000                               |
| <b>Electrolito</b>                | Membrana de polímetro sólido  | Membrana de polímetro sólido           | Solución acuosa de KOH                            | Ácido fosfórico líquido           | Carbonatos fundidos               | Solución líquida de LiKCO <sub>3</sub> |
| <b>Ventajas</b>                   | -Baja temperatura.<br>-Arranque rápido.<br>-Baja corrosión.<br>-Bajo mantenimiento. | -No necesita reformador de combustible | -Mayor eficiencia<br>Reacción catódica más rápida | Acepta H <sub>2</sub> impuro      | Reformado interno.                | Reformado interno.                     |
| <b>Aplicación</b>                 | Transporte Portátiles   | Portátiles                             | Espacial Militar                                  | Generación eléctrica distribuida. | Generación eléctrica distribuida. | Generación eléctrica distribuida.      |

Tabla 5.3 Tipos de pilas de combustible.[64]

- PEMFC: Pilas de intercambio protónico.
- DMFC: Pilas de metanol.
- AFC: Pilas alcalinas.
- PAFC: Pilas de ácido fosfórico.
- MCFC: Pilas de carbonato fundido.
- SOFC: Pilas de óxido sólido.

Cuando hablamos de aplicaciones portátiles, hacemos referencia al tipo de pilas de combustible utilizadas para los dispositivos eléctricos ya sea ordenadores, teléfonos, etc. Y en cuanto a las aplicaciones en el transporte, debemos destacar que el uso del hidrógeno como combustible está muy demandado en vehículos eléctricos y muy utilizado también en el ámbito del transporte marítimo. Hoy en día son las pilas de membrana de intercambio de protones (PEMFC) las más encontradas en el mercado. [64]

### **5.7 Pilas de combustibles a bordo.**

Como ya hemos hablado en el capítulo anterior, los sistemas híbridos de propulsión en buques funcionan gracias al uso de un parque de baterías necesario para la regeneración energética, además de reducir ruidos y vibraciones al evitar grandes generadores en el interior de los buques.

Existe un inconveniente en el uso de los parques de batería a bordo, y es que actualmente, solo disponen de almacenamiento de energía para pocas horas. Es posible distinguir entre las pilas de ácido, níquel-cadmio o las de ion-litio, como las más utilizadas en el ámbito

marítimo, destacando en el uso a bordo, las pilas de ácido. Sin embargo, su principal problema es que pueden sobrecargarse y por tanto pueden llegar a ser muy inflamables.

Lo llaman el combustible del futuro, pero hasta entonces le queda un largo camino por recorrer. El hidrógeno se establece, hoy en día, como la fuente de combustible más viable para la propulsión en buques que cuentan con sistemas híbridos o eléctricos a bordo. Las pilas de combustible son generadores que pueden estar alimentados por hidrógeno como combustible.

En la actualidad, tenemos en el mercados algunos barcos que cuentan con este sistema, y no es tan novedoso, el buque *FCS Alsterwasser*, fue el primer navío propulsado totalmente por células de hidrógeno en el año 2009, las cuales generaban un total de 100 kW de electricidad.

El motor principal de un buque puede estar alimentado por pilas de combustible, éstas además pueden alimentar un parque entero de baterías que generalmente están formadas por células de litio en donde se almacena la energía, la cual será utilizada cuando sea necesario una mayor potencia (superior al régimen de generación de potencia de la pila de hidrógeno), en cuyo caso, se hará uso del parque de baterías. El

tiempo en el que vamos a poder hacer uso de esa energía que nos proporciona el parque, será mayor cuanto mayor sea el número de dicho parque. [61]

Por tanto, estos sistemas disponen de dos fuentes de energía, las de pilas de combustible, que funcionan muy bien cuando el buque se encuentra con velocidad de crucero (aproximadamente de 17 nudos) y la batería eléctrica, en caso de alta demanda de energía, como puede ser el aumento de la velocidad

El hidrógeno es obtenido de diversas fuentes, como pueden ser del biodiésel, etanol, metanol y también a partir de electrólisis. Una de las ventajas reside en que no se necesitan, por tanto, grandes depósitos para su almacenamiento, debido a las características en las que se conserva el hidrógeno. Los tanques de hidrógeno transportados a bordo actualmente son de unos 140 m<sup>3</sup>, lo que equivale a unas 48 horas de propulsión con unas condiciones de velocidad establecidas en unos 17 nudos y una carga de 1500 pasajeros además de 2200 metros para vehículos. El generador de pila de hidrógeno es posible localizarlo en muchos lugares en el interior del buque, por lo que se puede aprovechar eficientemente el espacio a la hora de situar el generador. [65, 66]

## 5.8 Ventajas e inconvenientes de las pilas de combustible.

### Ventajas:

- Mayor eficiencia que los motores de combustión interna.
- No cuenta con partes móviles o piezas que pudieran estropearse.
- Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y mayor seguridad a bordo.
- Mayor rendimiento del suministro de electricidad.
- Disminución del ruido y vibraciones a bordo.
- Bajo mantenimiento.

### Desventajas:

- Elevado coste de producción e instalación.
- No existe una red de abastecimiento adecuada.
- A corto plazo, el uso del hidrógeno y las pilas de combustible no compensa los costes, ya que estos superan a los de las tecnologías convencionales.
- Necesidad de un catalizador (generalmente platino) para poder acelerar la reacción por lo que los costes pueden incrementarse. [68]

## **5.9 Viabilidad.**

Las pilas de combustible e hidrógeno son una tecnología que será muy utilizada en un futuro próximo en multitud de ámbitos debido, principalmente, a su capacidad de almacenamiento de energía, solo es necesario adecuar el precio para que sean económicamente viables. El uso de pilas de combustible en todo tipo de maquinaria en puerto supondrá el primer paso para dar a conocer este tipo de tecnología, acercándose cada vez más a los buques y su maquinaria interna. Otro de los inconvenientes es el uso del hidrógeno, debido a su costosa producción y el peligro que conlleva su almacenamiento, por lo tanto, una de las soluciones que se plantea es buscar un combustible alternativo al uso del hidrógeno y poder emplearlo de forma segura.

Existe actualmente el llamado proyecto MARANDA, que se encuentra financiado por la Unión Europea, el cual cuenta con un sistema híbrido mediante el uso de pilas de intercambio protónico (PEMFC) para aplicaciones marítimas. Durante estas pruebas, mientras los buques realizan mediciones, los motores principales se detienen para minimizar el ruido, además de las posibles vibraciones y, sobre todo, la contaminación del aire que podrían alterar los datos de las mediciones que se realizan. El equipo eléctrico del buque recibe energía a través de

la celda de combustible de 165 kW, además de aportarle energía al posicionamiento dinámico en el momento de las mediciones. El problema de estos sistemas en el ámbito marítimo es la falta de infraestructuras de hidrógeno, se requieren contenedores de almacenamiento de hidrógeno móvil que pueda ser abastecido en cualquier estación de repostaje de hidrógeno. Todo esto conllevaría a poder disponer del hidrógeno necesario en cualquier momento y en múltiples aplicaciones no solo en el sector marítimo. Es la empresa ABB Marine la encargada de diseñar la electrónica de potencia para convertir la energía de corriente continua de las celdas de combustible en la planta principal de distribución de corriente alterna utilizadas en el buque. Este proyecto tiene como objetivo principal aumentar el mercado de las celdas de combustible de hidrógeno principalmente en el sector marítimo. [66, 67]

# Capítulo 6

## *Nuevas Alternativas*

### **Introducción.**

La carrera contra el cambio climático solo acaba de comenzar. A pesar de las restrictivas normativas actuales, del auge de la propulsión híbrida eléctrica como alternativa “ideal” y las medidas desesperadas para abaratar precios y reducir emisiones, parece que no está muy claro qué es lo más viable hoy por hoy en el ámbito marítimo. Muchas son las alternativas al combustible fósil, sin embargo, no todo se aleja de este tipo de combustible.



El Gas Natural Licuado (GNL) es una de las alternativas marítima que está cobrando un papel importante en los últimos años. No llega a ser un combustible “cero contaminante”, pero contiene menos cantidades de óxidos de azufre, de nitrógeno y partículas en suspensión.

El GNL también se presenta como alternativa a los sistemas de limpieza de gases de escape que son más costosos y al uso de la propulsión híbrida. Se presenta como un combustible alternativo seguro y con múltiples ventajas.



*Figura 6.1 Buque GNL*

Pero no solo del gas natural nos vamos a centrar en este apartado, existen muchas otras alternativas que buscan eliminar o reducir el uso del combustible fósil como principal fuente de propulsión marina. Son el uso

en conjunto de las baterías actuales junto con la propulsión mediante GNL, una nueva combinación que se pone en marcha cada vez con mejores perspectivas de futuro, la propulsión híbrida GNL-Baterías.

## **6.1 Gas Natural.**

El Gas Natural es una fuente de energía fósil cuyo compuesto principal es el metano ( $\text{CH}_4$ ), de ahí su importancia en la propulsión. Se trata de una mezcla de gases e hidrocarburos presentes en la naturaleza. Para su transporte y distribución es necesario contar con depósitos adecuados para contener en su interior al gas de forma estable. Existen dos formas de almacenamiento, por un lado, mediante la compresión del gas natural en tanques, (Gas Natural Comprimido, GNC) con presiones alrededor de 240 atm. Por otro lado, el Gas Natural Licuado (GNL) a  $163^\circ\text{C}$  bajo cero. El primero es utilizado normalmente en vehículos como autobuses o taxis y el segundo está más enfocado en el transporte terrestre y marítimo debido principalmente a que a esa temperatura el volumen del gas se reduciría lo suficiente como para almacenarlo en tanques en el interior de los buques sin encarecer las cargas.

Es preciso nombrar el uso del Gas Licuado de Petróleo (GLP) que contiene una mezcla de butano y propano y es utilizado en la actualidad como combustible alternativo. Sin embargo, el GLP es más costoso y reduce en menor medida las emisiones a la atmósfera. Ambos compuestos resultan económicamente más asequibles que en el caso del combustible diésel o la gasolina, por lo que en los últimos años su uso ha ido en aumento, sobre todo del Gas Natural. Otra de las características que llama la atención como alternativa, tanto del GNC como del GNL, es su bajo contenido en emisiones nocivas a la atmósferas, en un porcentaje de hasta un 85% de reducción en el caso de los óxidos de nitrógeno y un 20% para el dióxido de carbono. [71]

Hay que distinguir, aunque no distan mucho uno del otro, entre el Gas Natural Comprimido y el Gas Natural Licuado. La diferencia fundamental radica en la fase en la que se encuentra cada uno de estos productos. El Gas Natural Comprimido se almacena a altas presiones, mientras que el Gas Natural Licuado se transporta y almacena a baja temperatura, lo que proporciona más autonomía que el GNC debido precisamente a su facilidad de manejo y transporte.

En la actualidad los buques GNL se desarrollan principalmente en Noruega, que se encuentra a la cabeza con respecto a otros países en cuanto a desarrollo y distribución. En España, de la mano de la empresa

*Baleària*, también se ha observado el incremento de ferrys que utilizan el Gas Natural Licuado como combustible. Lo que se busca con el uso de este sistema de propulsión es, además de cumplir con las nuevas normativas atmosféricas, la rentabilidad, sobre todo a la hora de transportar estos productos. Para ello es necesario enfriar el gas natural a unos  $-163^{\circ}\text{C}$  y poder licuarlo, de esta forma se consigue que no ocupe tanto espacio dentro de los tanques, ocupando menos volumen que si estuviera en forma de vapor. Otra de las aplicaciones para las que se utiliza el Gas Natural Licuado es en la propulsión diésel eléctrica, que utilizan el GNL como combustible resultando más eficiente que en el caso del uso de las turbinas de vapor tradicionales debido al combustible utilizado, que conlleva a un menor impacto ambiental. El objetivo, además de abaratar los precios es la reducción de las emisiones y cumplir con los límites establecidos<sup>8</sup>.

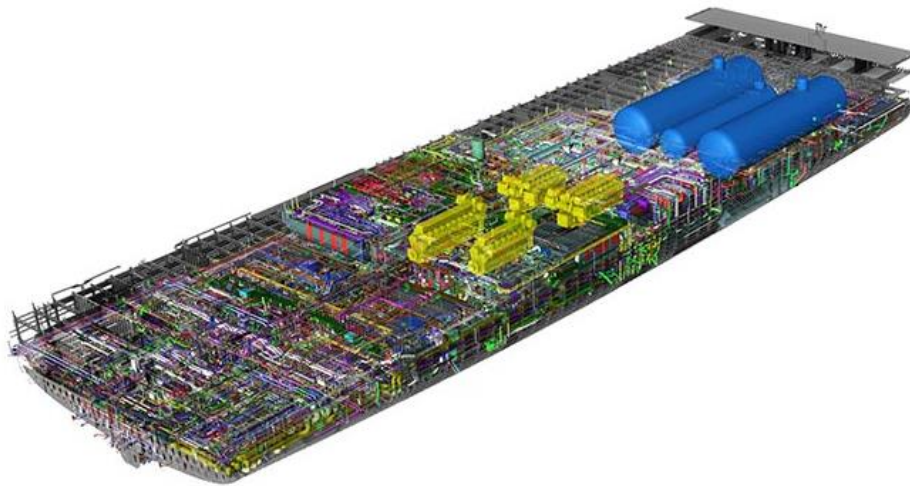
Alguna de las desventajas del uso de estos sistemas es la gran inversión inicial que es necesario realizar, superior a otros sistemas de propulsión vistos anteriormente. Es preciso la instalación en puerto de contenedores que dispongan del GNL listo para ser consumido por los buques, o la incrementación de barcos de abastecimiento de GNL para el servicio de repostaje. Por otro lado, es necesario también un mayor espacio

---

<sup>8</sup> Límites de emisiones de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y PM establecidos en el Capítulo 3 del presente trabajo.

en bodegas para ubicar los tanques que contienen el gas, lo que da lugar a diferencias notables en el flete para el transporte de mercancías.

Como ejemplo actual existen buques propulsados por GNL, entre ellos encontramos el crucero AIDANova y desde 2017 navega mediante propulsión a base de Gas Natural Licuado. Es capaz de propulsar un total de 183.900 toneladas además del transporte aproximado de 6000 pasajeros. Conocido con el concepto de “*Green Cruising*” se trata del primer crucero en utilizar el GNL como combustible y cuenta, además, con motores de unos 61.760 kW de potencia con 200 toneladas de peso cada uno. [69, 70]



*Figura 6.2 Distribución de la planta propulsora y tanques GNL del buque AidaNova [70]*

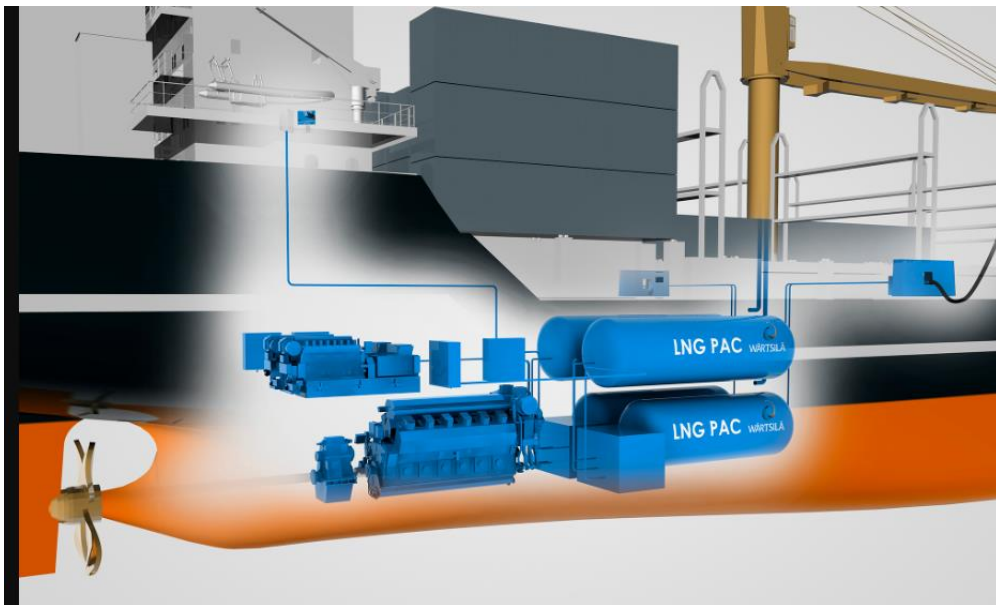
En la *Figura 6.2*, se puede observar la distribución de los tanques en el interior del buque AidaNova, toda la planta de procesamiento del GNL y la maquinaria distribuida a lo largo del casco de buque. El gas debe almacenarse en cilindros y ubicarlos de manera que no influya de forma

negativa en la estabilidad del propio buque. Es necesario también una formación específica por parte de los operarios a bordo para conocer y evitar cualquier tipo de riesgo que pudiera ocasionarse.

La empresa *Baleària*, nombrada anteriormente, también cuenta con varios *ferrys* que utilizan el GNL como combustible. Se realiza mediante la remodelación de buques que se encontraban ya en servicio. De esta forma se evita la producción de buques totalmente nuevos que cuentan con esta tecnología y se opta por una renovación de los buques que ya se dispone en la flota adaptando los motores e instalando tanques para contener el gas. Además, se ha calculado un total de 1100 millas de autonomía con un tanque de unos 425m<sup>3</sup> de capacidad, lo que resulta bastante tentador en cuanto eficiencia y coste. [72]

Existe una novedad con respecto a este tipo de combustible, algunos buques trabajan de forma conjunta con motores duales GNL y Diésel marino, los cuales intercambian un modo u otro según las zonas de navegación o los límites establecidos en determinadas zonas marítimas, se evita de esta forma los tratamientos posteriores de gases de escape o el coste elevado de instalaciones híbridas diésel-eléctrica. Se trata de una tecnología novedosa, pero que está teniendo mucha fuerza en los últimos años, ya que en buques antiguos la idea de restaurar solo una parte del

sistema de propulsión es bastante más económico que la fabricación conjunta de un sistema de propulsión basada en el uso del GNL totalmente nueva. Otro factor importante es que el gas natural que se encuentra en la tierra cuenta con una alta disponibilidad, por lo que, si su consumo se ve controlado, el abastecimiento estará, en principio, asegurado.[73]



*Figura 6.3 Tanques de GNL en sistema de propulsión dual (GNL- Diésel marino)*

El uso de este tipo de motores duales proporciona reducciones de hasta un 90% de óxidos de azufre. La ventaja se encuentra en que no es necesario el cambio de motor, basta con una modificación de este para que pueda operar haciendo uso de Gas Natural Licuado.

## **6.2 Ventajas e inconvenientes de los combustibles marinos.**

A modo de resumen y tras haber estudiado cada uno de los tipos de combustibles más utilizados en la actualidad, se expondrá a continuación en la *Tabla 6.1*, las diferencias más significativas de cada combustible utilizado a bordo. Se trata de las características más importantes que clasifican de alguna manera cada combustible y para qué tipo de buque podría ir destinado. Es complicado tomar la decisión de elegir el combustible adecuado para cada tipo de embarcación o para un fin determinado, para ello es necesario la realización de cálculos de potencia asociados a tipos de combustible y hacer un estudio de cada uno de ellos, verificando la eficiencia y rentabilidad, así como el ajuste a las normativas vigentes.



| Tipo de Combustible Marino | Ventajas  | Desventajas   |
|----------------------------|---|---|
| <b>Diésel Marino</b>       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor rendimiento térmico.</li> <li>• Menor consumo.</li> <li>• Menor coste de mantenimiento.</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ruido</li> <li>• Contaminación por gases durante la combustión.</li> <li>• Grandes motores.</li> <li>• Pérdidas de energía por fricción.</li> <li>• Calentamiento de la maquinaria.</li> <li>• Agotamiento de recursos no renovables.</li> </ul> |
| <b>Hidrógeno</b>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Energía renovable y recurso no limitado.</li> <li>• Energía limpia.</li> <li>• No es tóxico.</li> <li>• Produce mucha energía.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Coste elevado de producción.</li> <li>• Difícil de transportar y almacenar debido a las altas presiones requeridas</li> <li>• No existen suficientes infraestructuras con estaciones.</li> </ul>   |
| <b>GNL</b>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta reducción de emisiones: CO<sub>2</sub>, PM, NO<sub>2</sub></li> <li>• Reducción de ruidos.</li> <li>• Precio más económico.</li> <li>• Utilizado para todo tipo de transporte.</li> <li>• Seguridad.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Combustible fósil.</li> <li>• No existen actualmente las infraestructuras necesarias.</li> <li>• Necesidad de espacio para los tanques de combustibles.</li> <li>• Mayor peso de los tanques.</li> </ul>   |

Tabla 6.1 Ventajas y desventajas de los combustibles marinos. [74]

A la vista está que cada uno de los combustibles marinos ofrece ventajas y desventajas para unos fines u otros. Esto supone una odisea para quienes quiere abaratar precios y a la vez reducir emisiones tóxicas a la atmosfera. La clave se encuentra en optimizar y elegir qué combustible se adapta más al uso que se le va a dar al buque, la distancia recorrida, el tipo de mercancía a transportar, entre otros factores.

### **6.3 Baterías y propulsión GNL.**

Cada vez se escucha más la propulsión híbrida, pero esta vez centrado en el uso de baterías junto con una propulsión únicamente a base de GNL. Por ahora son solo proyectos con muy buenas perspectivas, otra opción más entre tantas, para dejar atrás al combustible fósil. Actualmente existe un proyecto de desarrollo entre las compañías *Wärtsilä* y *Samsung Heavy Industries* (SHI) sobre este tipo de propulsión híbrida de baterías en buques GNL como medio para reducir el coste que supondría las nuevas infraestructuras para el uso de pilas de combustibles o recargas eléctricas junto con la mejora del medio ambiente además de una mayor seguridad. Este proyecto está basado en la sustitución de los motores auxiliares que se encuentran a bordo de este tipo de buques, por baterías. Esto, según el director general supondrá también ahorro en los gastos de operación ya que

el consumo de combustible será considerablemente menor, por tanto, el mantenimiento de motores también se reducirá.

Actualmente existe una alta demanda de GNL por parte de muchos países en todo el mundo, y las previsiones esperan que siga en aumento. Se trata de introducir en el mercado un sistema de almacenamiento de energía que no dependa de la producción de energía y está enfocado en buques comerciales intercontinentales.

Con esta tecnología se busca dar el paso definitivo a la sostenibilidad de la próxima generación de buques “Eco-friendly” con el reto de mejorar la eficiencia operativa y reducir las emisiones evitando los equipos auxiliares a bordo. [75]

La compañía Rolls Royce también apuesta por este tipo de hibridación LNG/batería, pero esta vez aplicado a un yate de lujo, *Cristal Blue* el cual cuenta con dos generadores y combustible GNL junto con el banco de baterías que aportan 1 MWh de potencia sin requerir el uso de generadores en el momento en el que el barco se encuentra en puerto. Además, cuenta con propulsores *Azipull*<sup>9</sup> de carbono que le permiten navegar a una velocidad de 20 nudos máxima. [76]

España tampoco se queda atrás, el astillero Hijos de J. Barreras en

---

<sup>9</sup> **Azipull**: propulsor diseñado por Rolls Royce que cuenta con baja fricción y alta eficacia.

Vigo, desarrolla un proyecto para la construcción de dos buques híbridos gas natural licuado/baterías con el objeto de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, el cual cuenta con un parque de baterías que proporcionan una potencia de 6100 kWh y según dicen, es posible su adaptación a la tecnología de las pilas de combustible y el hidrógeno.

Estos *ferries* contará con cuatro motores de gas que pondrán en marcha los generadores y las baterías harán que los buques tengan una autonomía de cuatro horas a 10 nudos de velocidad.

Otro avance más en tecnología limpia en nuestro país. Ya son muchos los proyectos enfocados en este tipo de propulsión y se espera que sean todavía más en los próximos años. [77]



Figura 6.4 buque híbrido GNL/baterías.

Al final lo que se pretende es evitar la contaminación que tanto se ha hablado durante el proyecto y a la vez abaratando costes. Las baterías a bordo consiguen mejorar la eficiencia operativa y evitan las emisiones derivadas de los picos de demanda de energía en los equipos principales, disminuyendo también las emisiones en puerto. Para conseguir todos estos objetivos tenemos a nuestra disposición multitud de opciones limpias que pueden ser implantadas en los buques a medida que se van desarrollando tecnologías más seguras y eficientes.

## Conclusión

Todos los ojos están puestos en el concepto de hibridación, ya sea diésel-eléctrica o de GNL-Baterías, potentes alternativas a los fósiles contaminantes. En la actualidad, el uso de la propulsión híbrida (diésel-eléctrica) se extiende más ampliamente en el ámbito de los barcos de recreo y catamaranes de pequeña eslora que requieren menos potencia para su avance. Es por eso por lo que muchos de los fabricantes no se atreven a dar el paso en la implantación de este tipo de tecnologías en buques de gran tonelaje.

Son muchas las tecnologías a nuestro alcance, pero es necesario un ajuste específico para cada tipo de embarcación, requerimiento, lugar de navegación, entre otras características.

Las baterías juegan un papel importantísimo en este cambio, ya que de ellas dependen la capacidad de autonomía de los motores propulsores y como hemos visto, las de ion-litio son las que más se utilizan en la actualidad en el ámbito de la propulsión marina y automóviles.

La capacidad de almacenar la energía para poder ser empleada durante el mayor tiempo posible es un problema crucial en el avance en

tecnologías híbridas, esto será lo que marcará el cambio definitivo para desbancar al carbón de los medios de propulsión actuales y dar paso por fin, a las energías renovables.

## *Conclusion*

These days all ship technology revolving around hybrid system either diesel-electric o LNG-batteries, powerful alternatives to polluting fossils.

Currently, the use of hybrid propulsión (diesel-electric) is more thoroughly spread in the field of pleasure boat and small catamarans that require less power to move forward. That is whay many of the manufacturers do not take the step in the establishment of this type of technology in large tonnage ships.

There are many technologies within our reach, but a specific adjustment is necessary for each type of boat, requirement, place of navigation, among other features.

Batteries play a very important role in this change, since the autonomy capacity of the propulsion engines depends on them and; as we have seen, lithium-ion batteries are the ones most frequently used today, both in field of marine propulsion and electric and hybrid vehicles.

The ability to store energy to be used for as long as possible is a crucial problem in the latest advancement of hybrid technologies, this could mark



a turning point to unseat coal from the modern means of propulsion and finally give way, to renewable energies.

## Bibliografía y Webgrafía

[1] Tillerio, M. L. (2018, julio). Emisiones de CO2 en el Transporte Marítimo.

<https://repositorio.comillas.edu/jspui/bitstream/11531/29942/1/TFM000893.pdf>

[2] Noticias Parlamento Europeo. (2019, marzo). Emisiones de CO2.

<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emi>

[siones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia](https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emi-siones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia)

[3] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Gobierno de España.

(s.f.). Emisiones de efecto invernadero España.

<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y->

[medidas/transporte.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/transporte.aspx)

[4] The península, Qatar. (2018, 31 julio). Qatar como principal exportador de GNL del mundo.

<https://www.gnlglobal.com/mercados/medio-oriente/qatar-conserva-su-posicion->

[como-el-principal-exportador-de-gnl-del-mundo/](https://www.gnlglobal.com/mercados/medio-oriente/qatar-conserva-su-posicion-como-el-principal-exportador-de-gnl-del-mundo/)

[5] Gobierno de España. Ministerio. (s.f.). Tráfico Marítimo.

<https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan>

[ribera/contaminacion-marina-accidental/trafico\\_maritimo.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/costas/temas/proteccion-medio-marino/plan-ribera/contaminacion-marina-accidental/trafico_maritimo.aspx)

[6] TRANSPORT & ENVIRONMENT (T&E). (2019, 25 septiembre). EU shipping's €24bn/year fossil tax.

<https://www.transportenvironment.org/publications/eushippings-%E2%82%AC24bn-year-fossil-tax-holidays>

[7] TRANSPORT & ENVIRONMENT (T&E). (2019, 12 noviembre). Diesel incentivado para contaminar.

<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/transporte-maritimo-diesel-incentivado-24000-millones-euros-contaminar/20191112125243031443.html>

[8] Ibarra, D. (2019, noviembre 2). Navegación en España. Emisión de CO2.

<https://www.cambio16.com/transport-and-environment-las-emisiones-maritimas-europeas-socavan-los-objetivos-climaticos-internacionales/>

[9] OMI. (s.f.). Reduciendo las emisiones de óxidos de azufre.

<http://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Paginas/Sulphur-2020.aspx>

[10] Fraga, A. Q. (2016, junio). Comparativa entre motores Diesel y Gas Natural en Buques Marinos.

[https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/17265/QueijoFraga\\_Adrian\\_TFG\\_2016.pdf.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/17265/QueijoFraga_Adrian_TFG_2016.pdf.pdf?sequence=3&isAllowed=y)

[11] Shell. (s.f.). Gas Natural.

[https://www.shell.com/energy-and-innovation/natural-gas/providing-more-and-cleaner-energy/\\_jcr\\_content/par/toptasks.stream/1547802037560/14ae145c9ea0962e725f377d367f41f50536d8b56e80863c533d5cd8aa4122ec/natural-gas-providing-more-and-cleaner-energy-spanish.pdf](https://www.shell.com/energy-and-innovation/natural-gas/providing-more-and-cleaner-energy/_jcr_content/par/toptasks.stream/1547802037560/14ae145c9ea0962e725f377d367f41f50536d8b56e80863c533d5cd8aa4122ec/natural-gas-providing-more-and-cleaner-energy-spanish.pdf)

[12] Revista Sector Marítimo. Ingeniería Naval. (2019, julio). Presente y Futuro Del Uso De Combustibles Alternativos.

<https://sectormaritimo.es/presente-y-futuro-del-uso-de-combustibles-alternativos-en-la-altfuels-iberia-2019%EF%BB%BF>

[13] Web Oficial de la Unión Europea. (s.f.). Acuerdo de París. Recuperado de

[https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris\\_es](https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es)

[14] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (s.f.-b). Objetivos emisiones de gases efecto invernadero.

<https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/objetivos.aspx>

[15] Tilleró, M. L. (2018, julio). Emisiones de CO2 en el Transporte Marítimo.

<https://repositorio.comillas.edu/jspui/bitstream/11531/29942/1/TFM000893.pdf>

[16] OMI. (s.f.-b). Límites en contenido de azufre 2020.

<http://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/GHG/Documents/Preguntas%20frecu>

[entes%20-%20El%20I%C3%ADmite%20de%20contenido%20de%20azufre%20de%202020.pdf](#)

[17] Convenio MARPOL. (s.f.). Anexo VI revisado del Convenio MARPOL.  
[https://www.directemar.cl/directemar/site/artic/20190903/asocfile/20190903114650/marpol\\_enmienda\\_mepc\\_176\\_58\\_.pdf](https://www.directemar.cl/directemar/site/artic/20190903/asocfile/20190903114650/marpol_enmienda_mepc_176_58_.pdf)

[18] García, R. (s.f.). Zona de Control de Emisiones.  
<https://ingenieromarino.com/normativa-tecnologias-y-modificaciones-para-reducir-las-emisiones-de-sox-y-nox-a-la-atmosfera/>

[19] BOE. (2016, 11 mayo). DIRECTIVA (UE) 2016/802 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO.  
<https://www.boe.es/doue/2016/132/L00058-00078.pdf>

[20] Blog. Energía Solar. (2019, 30 mayo). Carbón.  
<https://solar-energia.net/energias-no-renovables/combustibles-fosiles/carbon>

[21] Moreno, J. M. (2016, marzo). El papel de la OPEP ante los retos de la Nueva Economía del Petróleo.  
[https://www.iefweb.org/wpcontent/uploads/2019/01/opec\\_nueva\\_economia\\_petroleo.pdf](https://www.iefweb.org/wpcontent/uploads/2019/01/opec_nueva_economia_petroleo.pdf)

[22] Marquard & Bahls AG. (2020, abril 24). Heavy Fuel Oil (HFO) | Glossary | Marquard & Bahls.

<https://www.marquard-bahls.com/en/news-info/glossary/detail/term/heavy-fuel-oil-hfo.html>

[23] M. (2020, febrero 11). Diésel (combustible) – Características, propiedades y usos.

<https://como-funciona.co/el-diesel/>

[24] Vivo, P. (s. f.). Funcionamiento del motor diésel.

<https://www.neptuno.es/funcionamiento-del-motor-diesel-parte-1/>

[25] Grupo de investigación del transporte marítimo de la Fundación de la Universidad de Oviedo. (s. f.). Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por barco.

[http://www.investigacionffe.es/documentos/enertrans/EnerTrans\\_Consumos\\_barco.pdf](http://www.investigacionffe.es/documentos/enertrans/EnerTrans_Consumos_barco.pdf)

[26] Pardo de Guevara, A. F, & Vázquez, Y. R. (2018, mayo). Nuevas tendencias en Propulsión Naval.

<https://armada.defensa.gob.es/archivo/personalescuelas/escano/trabajos/ECOM%20OF%20CP%20-nuevas-tendencias-de-propulsi%C3%B3n-naval>

[27] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. (s.f.). Gas natural.

<https://energia.gob.es/gas/Gas/Paginas/gasnatural.aspx>

[28] Gervasio, C., & Lamas, M. I. (s. f.). Análisis CFD de emisiones contaminantes Análisis CFD de emisiones contaminantes en el motor diésel en el motor diese. <file:///C:/Users/34664/Downloads/DialnetAnalisisCFDDeEmisionesContaminantesEnElMotorDiesel-4760181.pdf>

[29] Revista Sector Marítimo. Ingeniería Naval. (2019, julio). Presente y Futuro Del Uso De Combustibles Alternativos. <https://sectormaritimo.es/presente-y-futuro-del-uso-de-combustibles-alternativos-en-la-altfuels-iberia-2019%EF%BB%BF>

[30] Díaz, S. (2018, marzo 30). Energía Nuclear para la Propulsión naval. <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/13352/D%C3%ADaz%20Vej%C3%ADa%20Susana.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[31] W. (2007, febrero 24). Barcos eléctricos (Tecnología). <https://www.microsiervos.com/archivo/tecnologia/barcos-electricos.html>

[32] Sánchez, N. (2013, abril 7). Propulsión diésel eléctrica. Reducción del Consumo y la Contaminación Ambiental. <http://maquinasdebarcos.blogspot.com/2013/04/propulsion-diesel-electrica-reduccion.html>

[33] ABB. (s. f.). Shipping 4.0 - MARANDA - Aranda goes hybrid - Generations.

<https://new.abb.com/marine/generations/generations-2017/business-articles/maranda-aranda-goes-hybrid>

[34] Radar, D. (s. f.). POWER ELECTRONIC CONVERTERS FOR SHIP PROPULSION ELECTRIC MOTORS.

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.129.2768&rep=rep1&type=pdf>

[35] Canela Badrinas, V. (2018). Desarrollo del sistema de propulsión diésel-eléctrico.

[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/117057/132186\\_Desarrollo%20del%20sistema%20de%20propulsi%C3%B3n%20di%C3%A9sel-el%C3%A9ctrico%20de%20un%20catamar%C3%A1n%20-%20V%C3%ADctor%20Canela%20Badrinas.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/117057/132186_Desarrollo%20del%20sistema%20de%20propulsi%C3%B3n%20di%C3%A9sel-el%C3%A9ctrico%20de%20un%20catamar%C3%A1n%20-%20V%C3%ADctor%20Canela%20Badrinas.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

[36] Ingeteam. (s. f.). Modos de Propulsión híbrida.

<https://www.ingeteam.com/Download/2655/attachment/pc06ippt01-.pdf.aspx>.

[37] INGEDRIVE. (s. f.). Accionamientos Eléctricos Híbridos.

<file:///C:/Users/34664/Downloads/TFG%20RADIO/El%C3%A9ctricohibrido.pdf>

[38] La propulsión híbrida, una alternativa ecológica. (2014, noviembre 23).

<https://www.nauticayyates.com/equipo/la-propulsion-hibrida-propulsion-hibrida-en-serie-y-en-paralelo-una-alternativa-ecologica/>



[39] What is Azipod Propulsion System on Ship? (2014, 26 agosto).

<https://studymarineengg.tumblr.com/post/95803648326/what-is-azipod-propulsion-system-on-ship-azipod>

[40] Drozd, Y. (2016, 17 julio). Propulsión híbrida diésel–eléctrica en barcos de recreo.

<https://proyectosnavales.com/2016/07/17/propulsion-hibrida-diesel-electrica-en-barcos-de-recreo/>

[41] Bergh, L., & Helldén, U. (2007). Electrical systems in pod propulsion.

<http://webfiles.portal.chalmers.se/et/MSc/Bergh&HelldenMSc.pdf>

[42] What is Azipod Propulsion System on Ship? (2014, agosto 26).

<https://studymarineengg.tumblr.com/post/95803648326/what-is-azipod-propulsion-system-on-ship-azipod>

[43] Castro, J. d. D. (2010, diciembre 15). LA INNOVADORA PROPULSIÓN DEL LHD.

<https://armada.defensa.gob.es/archivo/rgm/2010/12/cap07.pdf>

[44] Danfoss. (2017, 31 abril). La alta eficiencia de la propulsión híbrida.

<https://www.danfoss.com/es-es/service-and-support/case-studies/dds/high-efficiency-hybrid-catapults-ms-goblin-to-the-forefront-in-bulk-carrier-shipping-propulsion/>

[45] Universidad de Cantabria. (s. f.). REGULACIÓN, CONTROL Y PROTECCIÓN DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

<https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1986/course/section/2310/convertidores.pdf>

[46] Atienza, H. (2017, enero 30). Barcos Híbridos y motores eléctricos.

[http://nauta360.expansion.com/2017/01/27/a\\_motor/1485518859.html](http://nauta360.expansion.com/2017/01/27/a_motor/1485518859.html)

[47] Diseño innovador para la propulsión de barcos. (2017, febrero 9).

<https://evolution.skf.com/es/disenno-innovador-para-la-propulsion-de-barcos/>

[48] MAN. (s. f.). Hybrid Propulsion.

<https://marine.mandieselturbo.com/docs/default-source/shopwaredocumentsarchive/hybrid-propulsion.pdf?sfvrsn=4>

[49] Megger. (s. f.). Guía de baterías.

[http://www.unitronics-electric.com/pdf/articulos/BatteryTestingGuideES\\_2\\_1.pdf](http://www.unitronics-electric.com/pdf/articulos/BatteryTestingGuideES_2_1.pdf)

[50] Martínez Bertran, J. (2017, abril). Métodos de estimación del estado de carga de baterías.

[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/104855/TFG\\_Jaume\\_Martinez\\_Metodos\\_de\\_estimacion\\_del\\_estado\\_de\\_carga\\_de\\_baterias\\_electroquimicas.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/104855/TFG_Jaume_Martinez_Metodos_de_estimacion_del_estado_de_carga_de_baterias_electroquimicas.pdf)

[51] Designs. (s. f.). Clasificación de las pilas y baterías - Rezagos.

<http://www.rezagos.com/pages/clasificacion-de-las-pilas-y-baterias-segun-sayds.html>

[52] Viera Pérez, J. C. (2013, mayo).

<https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/11142/UOV0036TJCVP.p>

[53] Baterías Ni-Cd. (s. f.)

<https://www.electronicafacil.net/tutoriales/Baterias-Ni-Cd.html>

[54] ENIX Power. (2017, 26 enero). Níquel Cadmio y Níquel metal hidruro

<http://www.enix-power-solutions.es/niquel-cadmio-y-niquel-metal-hidruro/>

[55] Automóvil, T. (2020, 22 julio). Tipos de baterías de propulsión del coche eléctrico.

<https://www.tecnologia-automovil.com/actualidad/tipos-de-baterias-coche-electrico/>

[56] Mártil, I. (2019, 10 octubre). Qué son y para qué sirven las baterías de iones de litio.

<https://blogs.publico.es/ignacio-martil/2019/10/11/que-son-y-para-que-sirven-las-baterias-de-iones-de-litio/>

[57] Mártil, I. (2019b, diciembre 10). Funcionamiento de una batería de ion-litio.

<https://blogs.cdecomunicacion.es/ignacio/2019/02/21/funcionamiento-de-una-bateria-de-ion-litio-pros-y-contras/>

[58] N. (2017, 24 julio). Batería de litio: ventajas y desventajas de uso.

<http://nmeza.over-blog.com/article-bateria-litio-ventajas-desventajas-85929438.html>

[59] AMETIC. (2012, 21 diciembre). DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS CLAVE EN EL SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS DE VEHÍCULOS.

[https://ametic.es/sites/default/files//media/ANEXO2\\_Gestion\\_tratamiento\\_%20bater%C3%ADas\\_vehiculo\\_electrico%20e%20h%C3%ADbrido%20%281%29.pdf](https://ametic.es/sites/default/files//media/ANEXO2_Gestion_tratamiento_%20bater%C3%ADas_vehiculo_electrico%20e%20h%C3%ADbrido%20%281%29.pdf)

[60] Wu, P., & Bucknall, R. (s. f.). Marine propulsion using battery power.

<https://conferences.ncl.ac.uk/media/sites/conferencewebsites/scc2016/1.4.2.pdf>

[61] Fondear. (2011). Sistemas híbridos.

[http://www.fondear.org/Ecologia-Nautica/Revolucion\\_Hibrida/Revolucion\\_Hibrida.asp](http://www.fondear.org/Ecologia-Nautica/Revolucion_Hibrida/Revolucion_Hibrida.asp)

[62] Peidro, J. L. (s. f.). LAS PILAS DE COMBUSTIBLE. Recuperado de

<http://personales.upv.es/%7Ejlpeidro/pilas/pilas.htm>

[63] Castro, A. I. (2014, junio). Pilas de combustible en el sector aeronáutico.

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60211/fichero/Pfc+Ana+Isabel+Castro+Romero.pdf>

[64] Centro Nacional de Hidrógeno. (2018). Pilas de Combustible.

<https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/>

[65] Luleva, M. (2012, octubre 24). FCS Alsterwasser: The First Ship Powered by Hydrogen Fuel Cells.

<https://www.greenoptimistic.com/fcs-alsterwasser-the-first-ship-powered-by->

[hydrogen-fuel-cells-20121024/](#)

[66] M. (2012, octubre 14). Tecnología del transporte: Pilas de combustible para reducir las emisiones del transporte marítimo.

<https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/tecnologia-del-transporte-pilas-de-combustible-para-reducir-las-emisiones-del-transporte-maritimo>

[67] Naval, R. I. (2019, 29 enero). Continúa la apuesta por el uso de células de combustible de hidrógeno para la propulsión de buques.

<https://sectormaritimo.es/continua-la-apuesta-por-el-uso-de-celulas-de-combustible-de-hidrogeno-para-la-propulsion-de-buques>

[68] Castro, A. I. (2014, junio). Pilas de combustible en el sector aeronáutico.

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60211/fichero/Pfc+Ana+Isabel+Castro+Romero.pdf>

[69] ANAVE. (2019, mayo). Buenas perspectivas para los buques propulsados por gas natural licuado.

[http://www.anave.es/images/seguridad/anave-buenas\\_perspectivas\\_para\\_buques\\_propulsados\\_por\\_lng-jun\\_09.pdf](http://www.anave.es/images/seguridad/anave-buenas_perspectivas_para_buques_propulsados_por_lng-jun_09.pdf)

[70] Pospiech, P. (2017, 18 diciembre). “Green Cruising” bei AIDA Cruises.

<http://www.veus-shipping.com/2017/12/green-cruising-bei-aida-cruises/>

[71] Ibarra, D. (2019, 2 noviembre). Navegación en España. Emisión de CO2.

<https://www.cambio16.com/transport-and-environment-las-emisiones-maritimas-europeas-socavan-los-objetivos-climaticos-internacionales/>

[72] ANAVE. (2020, abril). EL TRANSPORTE MARÍTIMO, AÚN MÁS ESENCIAL DURANTE LA PANDEMIA.

<file:///C:/Users/34664/Downloads/TFG%20RADIO/Boletín%20ANAVE%2004-2020.pdf>

[73] ENAGAS GTS. (2014, 19 marzo). GNL COMO COMBUSTIBLE MARINO. SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS.

<https://www.enagas.es/stfls/EnagasImport/Ficheros/gestionTecnicaSistema/pdf/document1.pdf>

[74] FITSA, & IDAE. (2008). Nuevos combustibles y tecnologías de propulsión.

[https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_Nuevos\\_Combustibles\\_6\\_2d83b8b8.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Nuevos_Combustibles_6_2d83b8b8.pdf)

[75] Rivera. (s. f.). Will batteries power the next generation of LNG carriers?

<https://www.rivieramm.com/opinion/opinion/will-batteries-power-the-next-generation-of-lng-carriers-54944>

[76] Naval, R. I. (2017, 14 noviembre). Propulsión híbrida LNG y digital technology.

<https://sectormaritimo.es/yate-propulsion-hibrida-lng>

[77] Navalía, C. (2018, 16 octubre). Los buques con más baterías del mundo se harán en Vigo.

<https://www.navalia.es/es/noticias/sector-naval/1983-los-buques-con-mas-baterias-del-mundo-se-haran-en-vigo>

[78] MAN. Energy Solutions. (2019, septiembre). Batteries on board ocean-going vessels.

[https://marine.man-es.com/docs/librariesprovider6/test/batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf?sfvrsn=9c69d8a2\\_4](https://marine.man-es.com/docs/librariesprovider6/test/batteries-on-board-ocean-going-vessels.pdf?sfvrsn=9c69d8a2_4)