

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA  
Y MAQUINAS NAVALES**

**HIBRIDACIÓN DE UN REMOLCADOR**

**PORTUARIO**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**DIRECTOR: MIGUEL ÁNGEL GÓMEZ**

**SOLAETXE**

**AUTOR: MIKEL SOLAS PASTOR**

**PORTUGALETE**



## **AGRADECIMIENTOS**

Me gustaría agradecer toda la ayuda prestada a Miguel Ángel Gómez Solaetxe por haberme orientado en la decisión de realizar este Trabajo Fin de Grado y evidentemente por su colaboración en el mismo. Y a la tripulación del "*IBAZABAL DIEZ*" por haberme ayudado en todo el proceso de recogida de datos, además de haberme enseñado como operan los remolcadores y tener así la posibilidad de explorar nuevos campos de trabajo.



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>11</b>
2.1 REMOLCADORES CON PROPULSIÓN DIESEL MECÁNICA. REMOLCADORES TRADICIONALES.....	13
2.2 REMOLCADORES O BARCOS MULTIPROPÓSITO HÍBRIDOS. DIESEL- ELÉCTRICOS CON O SIN BATERÍAS Y GAS NATURAL-ELÉCTRICOS CON O SIN BATERÍAS.....	16
2.2.1 Diesel-eléctricos con o sin baterías.....	17
2.2.2 Gas natural-eléctricos con o sin baterías.....	18
2.3 BUQUES CON PROPULSIÓN MEDIANTE PILAS DE HIDROGENO.....	22
2.3.1 Mala publicidad de los sistemas que usan hidrógeno.....	25
2.4 BARCOS MULTIPROPÓSITO HÍBRIDOS DIESEL-ELÉCTRICOS PERO A VELOCIDAD VARIABLE.....	26
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>31</b>
<b>4. FUNDAMENTO TEÓRICO.....</b>	<b>33</b>
4.1 REDUCCIÓN DE EMISIONES.....	33
4.2 REDUCCIÓN DE CONSUMOS Y TIEMPOS DE TRABAJO.....	38
<b>5. METODOLOGÍA.....</b>	<b>43</b>
<b>6. DESARROLLO.....</b>	<b>45</b>
6.1 CARACTERÍSTICAS DEL REMOLCADOR.....	45
6.1.1 Motores principales.....	46
6.1.2 Generadores eléctricos.....	48
6.1.3 Otros consumidores de energía importantes.....	51

6.2 TIPOS DE PROPULSIÓN Y GENERACIÓN ELÉCTRICA. ....	51
6.2.1 Propulsión diesel mecánica. Propulsión y generación de referencia.....	52
6.2.2 Propulsión híbrida. Propulsión y generación de estudio. ....	53
6.3 NUEVOS EQUIPOS. ....	54
6.4 ESTUDIO COMPARATIVO.....	59
6.4.1 Condicion N°1: Maniobra.....	60
6.4.1.1 Datos de los manuales del remolcador. ....	60
6.4.1.2 Datos obtenidos durante las prácticas.....	62
6.4.1.3 Comparación.....	63
6.4.2 Condicion N°2: Navegación .....	66
6.4.2.1 Datos de los manuales del remolcador. ....	66
6.4.2.2 Datos obtenidos durante las prácticas.....	67
6.4.2.3 Comparación.....	68
6.4.3 Condicion N°3: Espera/Stand-by.....	70
6.4.3.1 Datos de los manuales del remolcador. ....	70
6.4.3.2 Datos obtenidos durante las prácticas.....	71
6.4.3.3 Comparación.....	71
6.4.4 Condicion N°4: Amarrado al muelle. ....	73
6.4.4.1 Datos de los manuales del remolcador. ....	73
6.4.4.2 Datos obtenidos durante las prácticas.....	74
6.4.4.3 Comparación.....	75
6.4.5 Condicion N°5: Amarrado al muelle, pero con toma de tierra. ....	76
<b>7. CONCLUSIONES. ....</b>	<b>79</b>

<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	83
------------------------------	----



## **1. INTRODUCCIÓN.**

En Febrero de 2014 emprendí mis últimos tres meses de prácticas, a bordo de un remolcador portuario, para poder obtener el título de Segundo Oficial de Máquinas de la Marina Mercante. Durante el periodo que realicé el embarque, tuve que completar varios trabajos sobredicho remolcador, para acreditar las prácticas del Curso Puente a Grado en Marina. Durante este tiempo el tutor de las mismas prácticas, Miguel Ángel Gómez Solaetxe, me sugirió algunas ideas que podía llevar a cabo en el Trabajo Fin de Grado que debía presentar para finalizar el Grado.

En todas ellas se tenía el planteamiento de aprovechar el remolcador como fuente de datos y obtener los parámetros necesarios para cualquier estudio. Se tomo la decisión de realizar una hibridación ya que suponía observar las diferentes situaciones en las que el remolcador actúa en el puerto de Santurce. Al haber estado presente en cada una de las situaciones se pueden disponer de los datos necesarios para elaborar el trabajo.

Otro aspecto fundamental por el cual nos decantamos por esta opción es el auge que se está produciendo en torno a las hibridaciones de embarcaciones marinas. Con el paso de los años la tecnología ha avanzado considerablemente como para plantear la idea de la hibridación de buques. Se han realizado números proyectos en los que se diseñan barcos, muchos de tamaño medio como los remolcadores, desde su misma concepción para que sean híbridos.

El interés del trabajo no recae en diseñar un remolcador híbrido desde el inicio, consiste en hacer un estudio sobre cómo afectaría a aspectos técnicos el cambio en los sistemas de propulsión y generación eléctrica. Pasar de una propulsión diesel-mecánica a una propulsión híbrida. Esta es la idea fundamental sobre la que se tratará a lo largo de este Trabajo Fin de Grado.



## 2. ESTADO DEL ARTE.

En este apartado se explicará que se está llevando a cabo para reducir el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes de los barcos. Para ello puede haber múltiples soluciones, en las que se modifican los sistemas de propulsión y los de generación eléctrica, esto se realiza añadiendo una fuente nueva de energía. Durante este Trabajo Fin de Grado no se estudiarán barcos de recreo se centrará en buques comerciales, ya que generalmente los buques comerciales son los precursores en el uso de estas tecnologías.



Figura 1. Cubierta del RO-RO "AURIGA LEADER" con los 328 paneles solares.[1]

Se añaden fuentes como la energía solar, la eólica o incluso la mareomotriz, dos casos representativos de estas fuentes pueden ser el buque RO-RO "AURIGA LEADER" y el también RO-RO "ORCELLE". El primero de ellos es propiedad de la empresa NIPPON YUSEN, dedicada al tráfico mundial de mercancías de carga rodada. El RO-RO es un

experimento entre dicha empresa y NIPPON OIL, una petrolera japonesa, para diseñar un buque con paneles solares y estudiarlo durante dos años. Eligieron los paneles solares porque podían ser más efectivos en el buque que en tierra, debido a que recibían mayor luz solar y el aire contribuía a refrigerarlos.

La experiencia comenzó en el año 2008 con el viaje inaugural, el "*AURIGA LEADER*" equipado con 328 paneles solares generaron 32300kW/h 1,4 veces más de lo que lo hubieran hecho en tierra. La energía solar proveyó un 0,05% en la propulsión del buque y en un 1,00% en la electricidad, para usos varios como operar bombas o iluminación. Las estimaciones hablan de una reducción de fuel de 13 toneladas y de 40 toneladas del CO<sub>2</sub> producido, en un periodo de un año. Por eso la compañía desarrolla investigaciones para mejorar estos márgenes y contribuir a la reducción de emisiones y consumos de combustible. Además durante estos dos años se comprobó si las células fotovoltaicas son capaces de aguantar las duras condiciones de la mar, como la corrosión, los fuertes vientos y la fuerte lluvia. Los paneles mostraron que son capaces de continuar operando a pesar de vientos de hasta 20m/s y periodos de fuerte lluvia durante 4 horas.[2]



Figura 2. Boceto del proyecto del "*ORCELLE*". [3]

Por otra parte el RO-RO "*ORCELLE*" es un proyecto, que se comenzó a diseñar en 2004 y está previsto que entre en servicio en el año 2025, de la compañía noruega Wallenius

WILHELMSEN. Se quiere reducir las emisiones de gases de escape y las marítimas a cero, para ello utilizará pilas de combustible y energías renovables como la solar, eólica y mareomotriz y eliminará el agua de lastre para evitar las emisiones marítimas. Con su diseño en forma de pentamarán, que aporta más estabilidad; y la ausencia de un eje con una hélice tradicional, utilizará dos hélices acimutales para propulsarse, permiten eliminar los tanques de lastre. Por último el uso del aluminio y los termoplásticos en la construcción del mismo contribuyen al reciclado de materiales, aumento de la resistencia, disminución del mantenimiento y facilitan la construcción.[4]

Las placas fotovoltaicas irán instaladas sobre las velas dando energía cuando el velamen este recogido, las velas se utilizarán para propulsar el barco éstas se moverán sobre un eje, que podrá orientarse al viento, para crear la fuerza de arrastre necesaria para mover el buque. El "*ORCELLE*" llevará 12 aletas que utilizarán el movimiento de las olas y el propio barco para producir electricidad o hidrógeno según sea necesario. También pueden servir de propulsor si son accionadas desde el buque. Los paneles solares producirán 2500kW y tendrán una superficie de 800m<sup>2</sup> cada uno, las velas serán de una superficie de 1400m<sup>2</sup> y por último las aletas una superficie de 210m<sup>2</sup> cada una. La energía obtenida de las células de combustible será de 10000kW y cada una de las hélices acimutales consumirá 4000kW.[5]

Además de estos casos existen otras posibilidades que se asemejan más a lo que se va a tratar en este Trabajo Fin de Grado. Y son las expuestas a continuación.

## 2.1 REMOLCADORES CON PROPULSIÓN DIESEL MECÁNICA. REMOLCADORES TRADICIONALES.

Dentro de este primer apartado se incluyen prácticamente todos los remolcadores que hay en la actualidad, ya que los remolcadores que presentan propulsiones híbridas son todavía una excepción. Aunque cada vez con más frecuencia se empiezan a diseñar buques con

esta configuración de propulsión, ya que poseen numerosas ventajas y son muy adecuadas para campos de trabajo muy concretos.

Independientemente del tipo de hélices que utilicen, ya sea a través de un eje, acimutales o cicloidales (más conocidos por su nombre comercial propulsores Voith) todos necesitan de una transmisión mecánica. Generalmente se utilizan motores de dos tiempos para remolcadores con hélices convencionales y motores de cuatro tiempos para los acimutales y los Voith. Dado que el primero de ellos está en desuso, no hay constancia de que se construyan remolcadores que no lleven sistemas Voith o acimutales, no se hará referencia en este Trabajo Fin de Grado.

A continuación se describe el funcionamiento de uno de estos barcos, como puede ser el *"IBAZABAL DIEZ"* con una propulsión Voith. Se tratará sobre el remolcador propiedad de Salvamento Marítimo y operado por la empresa pública Remolques Marítimos *"MARIA ZAMBRANO"*, que opera en el golfo de Cádiz. Este remolcador es uno de los siete de la clase María de Maeztu, que surgieron a raíz del hundimiento y derrame del petrolero *"PRESTIGE"* en el año 2002. Ya que durante las labores de remolque del buque y la posterior retirada del vertido, se tuvieron que alquilar remolcadores para cumplir con la tarea. Los siete fueron construidos en el astillero de Boluda, conocidos anteriormente como Unión Naval de Valencia.[6]

El *"MARIA ZAMBRANO"* es un remolcador de altura con una eslora de 39,7 metros y una manga de 12,5 metros. Tiene una capacidad de tiro de 60 toneladas y puede navegar a 12,7 nudos a máxima potencia. Dicha potencia es suministrada por dos motores diesel marinos de la marca ABC (ANGLO BELGIAN CORPORATION) modelo 8MDZC-1000-175 A, de 8 cilindros en línea, 4 tiempos. Trabajando a 1000 r.p.m. tiene una potencia de 1852kW o 2508 C.V. su régimen de trabajo va desde las 450 a las 1000 r.p.m. con un consumo de 193gr/kWh.[7]

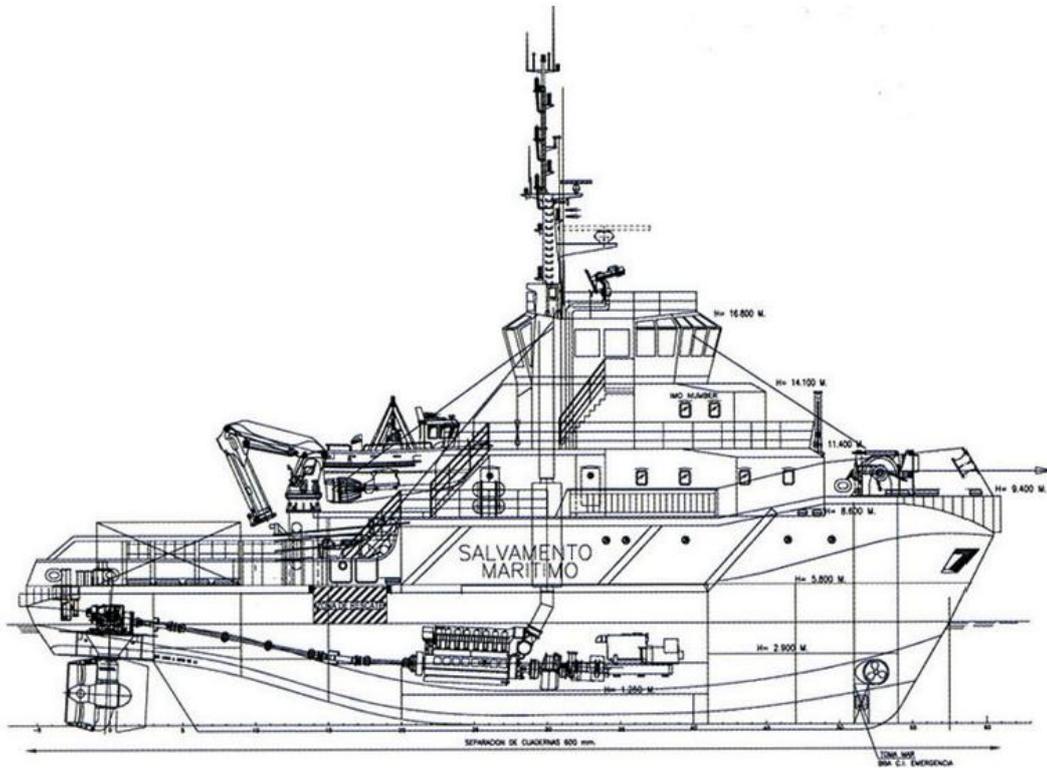


Figura 3. Esquema del "MARIA ZAMBRANO", perteneciente a la clase María de Maeztu. En dicho esquema se observa el sistema de propulsión con la reductora encima del acimutal.[8]

El buque como ya se ha señalado anteriormente tiene dos propulsores acimutales SCHOTTEL tipo SRP 1215 CP. Los mismos reciben la potencia de los motores principales en un rango de 450 a 1000 r.p.m. de entrada y la transmiten a las hélices a un régimen de entre 135 y 300 r.p.m. Pueden girar 360° gobernados hidráulicamente y la hélice, que va alojada en el interior de una tobera es de paso variable, aumentando progresivamente tanto paso como revoluciones a medida que se necesita empuje. El propio propulsor lleva integrado en su diseño la reductora con una relación de 3,582/1.[9]

## 2.2 REMOLCADORES O BARCOS MULTIPROPÓSITO HÍBRIDOS. DIESEL-ELÉCTRICOS CON O SIN BATERÍAS Y GAS NATURAL-ELÉCTRICOS CON O SIN BATERÍAS.

Dentro de este apartado se encuentran la mayoría de los buques híbridos más comunes actualmente, no solo remolcadores sino también barcos multipropósito o ferris como los que a continuación se mencionaran. Diferenciaremos los buques en dos categorías diesel-eléctricos con o sin baterías y gas natural-eléctricos con o sin baterías.

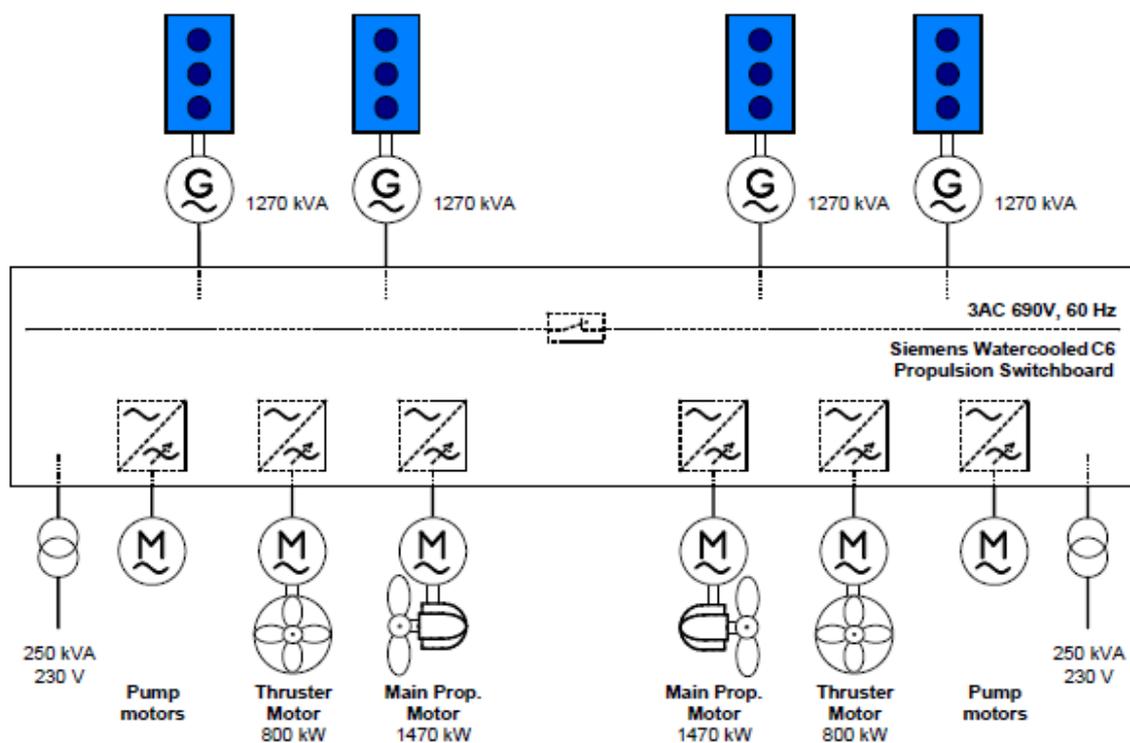


Figura 4. Esquema del sistema de propulsión y generación eléctrica del "SKANDI COMMANDER".[10]

Además se pueden tener remolcadores que no tienen una propulsión híbrida, tienen una propulsión eléctrica, unos generadores eléctricos generan electricidad para mover el buque y para servicios. Ese es el caso del barco de apoyo a plataformas "SKANDI COMMANDER" que cuenta con cuatro generadores eléctricos, accionados por motores de combustión interna, de 1270kVA de potencia aparente, 690V de tensión y una frecuencia

de 60Hz. La corriente eléctrica se envía a un cuadro de propulsión refrigerado por agua, de la marca SIEMENS modelo C6, a través de unos convertidores de frecuencia, también de SIEMENS clase Masterdrives, se envía a las hélices de proa y a los acimutales de propulsión. Los motores de los acimutales, son dos, tienen una potencia de 1470kW y los motores de las dos hélices transversales de proa 800kW, también se utiliza para mover los motores de las bombas de la sala de máquinas. Además de mandarse a unos transformadores que pasan la tensión a 230V para el resto de equipos de máquinas, puente y la acomodación.[11]

### 2.2.1 DIESEL-ELÉCTRICOS CON O SIN BATERÍAS.

En este caso se tiene el buque multipropósito "*SKANDI MONGSTAD*" propiedad de la empresa noruega DOF ASA que cuenta dos ejes de cola accionados por dos motores, que a la vez mueven una hélice, con una potencia aparente de 3600kVA cada uno. Además posee dos generadores auxiliares con una potencia aparente de 1617kVA cada uno, tanto los auxiliares como los ejes de cola producen a una tensión de 690V y 60Hz. Ambas parejas de equipos transfieren la corriente a un cuadro equipado con convertidores de frecuencia BlueDrive de la marca SIEMENS. Tras pasar por los convertidores, de corriente alterna a corriente alterna, la corriente se utiliza en los equipos como los tres acimutales, proa, babor y estribor, con una potencia de 1200kW. Además de los motores de las dos hélices transversales de proa de 880kW y el motor de la hélice transversal de popa de 590kW.[12]

También están los dos motores que muevan las bombas de agua salada que alimentan los cañones de las FI-FI, con una potencia de 2000kW cada uno. Por último están los transformadores que transforman la tensión de 690V a 230V o 440V para los servicios de la sala de máquinas, del puente y de la acomodación.[13] Dichos transformadores están protegidos con filtros THD, para evitar la distorsión armónica, que es cuando aparecen frecuencias múltiples de la frecuencia y cuya amplitud va decreciendo según aumenta el múltiplo. Los mayores problemas de los múltiplos son los de la corriente que generan sobrecalentamiento de los transformadores y disparos imprevistos de los interruptores automáticos.[14]

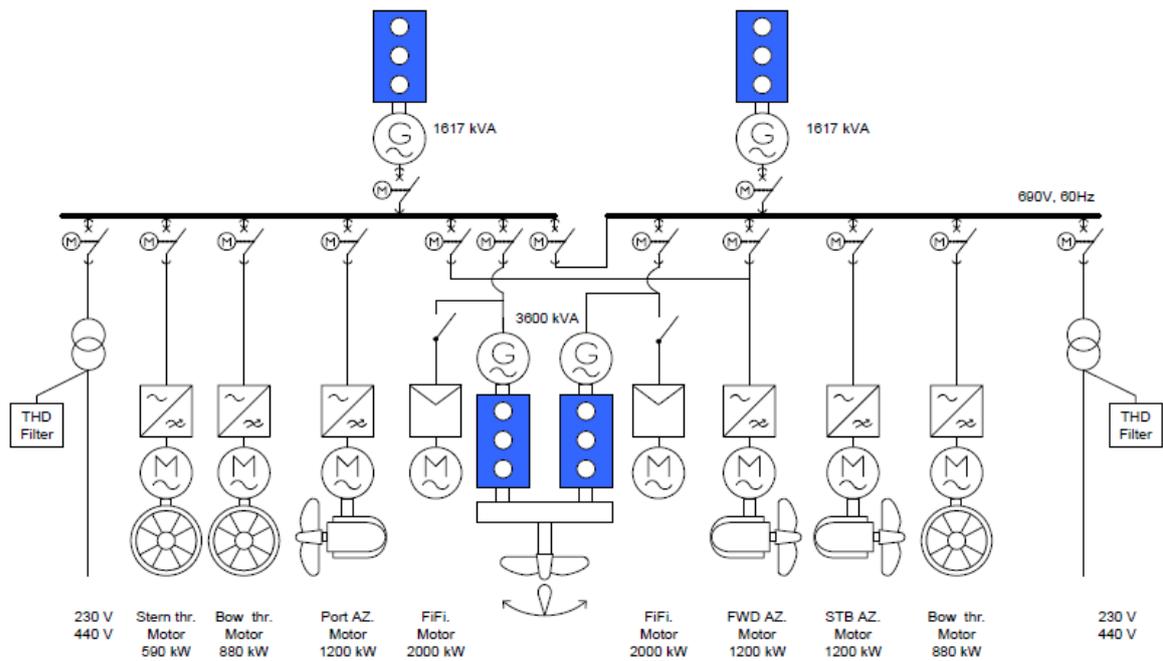


Figura 5. Esquema del sistema de propulsión y generación eléctrica del "SKANDI MONGSTAD".[15]

Esta configuración le permite operar de muchas formas, puede operar solo con los generadores auxiliares o solo con los ejes de cola, dependerá de en situación se encuentre el buque en cada momento. No se tendrá el mismo consumo de energía si el buque está amarrado a puerto, donde puede que con un generador eléctrico sea suficiente, o cuando esta navegando para acudir a un servicio, donde necesitará toda su potencia los dos auxiliares y los dos ejes de cola. Este es la opción sobre la que se basará la comparación en este Trabajo Fin de Grado, solo que se añadirá el uso de baterías para aumentar aún más la eficiencia.

## 2.2.2 GAS NATURAL-ELÉCTRICOS CON O SIN BATERÍAS.

Respecto a los buques que pueden usar gas natural como medio de propulsión no se tratarán en profundidad durante este Trabajo Fin de Grado, únicamente se hará una

referencia sobre ellos. Dado que el uso de gas natural en este estudio requeriría una mayor profundización, ya no sería una comparación entre dos sistemas de propulsión, debido a que se tendría que modificar el diseño de todo el buque. Cabe destacar que dentro del uso del gas natural se podría dar una variante utilizando también el diesel como combustible. Esto quiere decir que se debería de instalar un motor que pueda trabajar con los dos combustibles, dual fuel, como ya utilizan algunos barcos encargados del transporte de gas.

Ya se ha mencionado que la implantación del gas natural como combustible requiere de unas medidas de seguridad muy importantes. Dado que actualmente no hay un código, como podría ser el SOLAS o el MARPOL, sobre cómo han de construirse estos barcos, la IMO (International Maritime Organization por sus siglas en inglés) ha decidido publicar una resolución. Dicha resolución es la MSC285(86), pero se espera que a mediados de la primavera de 2015 se apruebe el código IGF (International Code of Safety For Ships Using Gases or Other Low-flash Point Fuels por sus siglas en Inglés) Que contendrá "disposiciones obligatorias para la disposición, instalación, control y monitorización de maquinaria y equipos que utilicen como combustible gas (principalmente LNG) y otros combustibles con bajo punto de inflamación"[16]. Se aplicara a todos los barcos de nueva construcción y a aquellos que utilizan combustibles convencionales y serán reformados para usar LNG, a excepción de los menores de 500GT.[17]

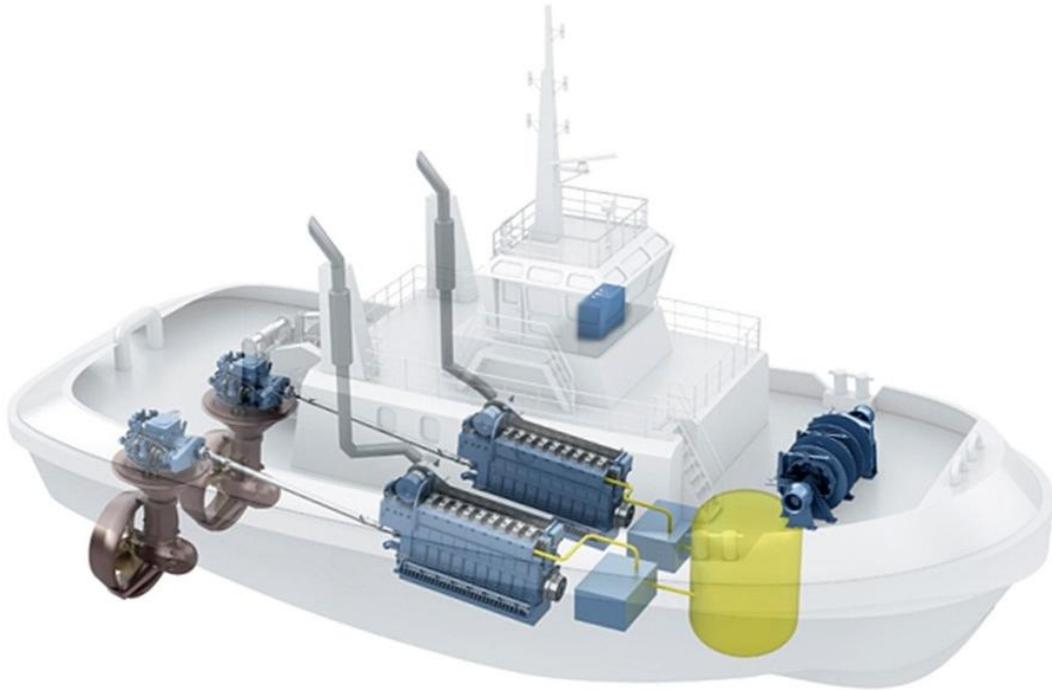


Figura 6. Esquema de propulsión del remolcador "BORGGOY". [18]

Hay numerosos casos de buques que ya funcionan con gas natural o que tienen previsto a acondicionar sus equipos para usarlo. Por ejemplo el primer remolcador en el mundo en usar gas natural el "BORGGOY", solamente lo usa para la propulsión ya que para la generación eléctrica el buque utiliza generadores diesel. Este remolcador de la empresa noruega BUKSER tiene dos motores, C26:33L6PG, desarrollados por ROLLS ROYCE que entregan una potencia de 3410kW a 1000 r.p.m. Dichos motores van acoplados a dos acimutales, US35 último modelo, también de ROLLS ROYCE de 3 metros de diámetro. Los motores pueden operar a bajos rangos sin restricciones y tienen unos tiempos de subida y baja de potencia muy rápidos, además son sencillos de mantener y de operar. Respecto a las emisiones, estos motores contribuyen a su disminución ya que las emisiones de CO<sub>2</sub> se aminoran en un 26% y las de NOX se reducen en un margen de 80-90%. [19]

Hay numerosos ferris que ya utilizan el gas natural para la propulsión como puede ser el ferri "MS STAVANGERFJORD" que utiliza cuatro motores BV12PG produciendo cada uno 5,6MW. El gas natural está almacenado a proa de los motores en dos gemelos de

296m<sup>3</sup>. Existe también un proyecto llevado a cabo por la empresa TOTE MARITIME para utilizar el gas natural en sus portacontenedores. Utilizando motores MAN 8L70ME-CE.2GL y colocando los tanques para el gas natural a popa de la acomodación sobre la cubierta, tienen previsto construir tres de barcos de este tipo a lo largo del año 2015.[20]

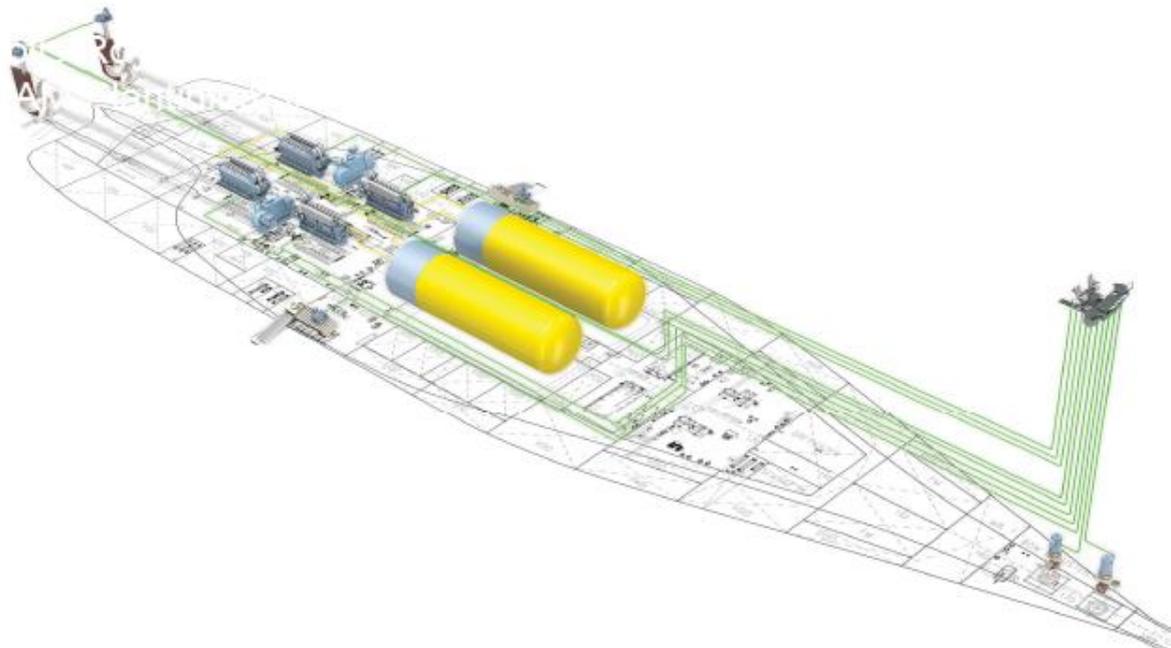


Figura 7. Esquema del sistema de propulsión y control del "MS STAVANGERFJORD".[21]

Como ejemplo de barco con propulsión dual-fuel se tiene al "F.A GAUTHIER" que tiene instalados 4 motores WÄRTSILÄ 12V34DF con una potencia de 20880kW. Este ferri tiene una eslora de 133m y tiene capacidad para llevar 800 pasajeros y 180 coches. Por último existe un proyecto para remodelar la generación eléctrica del ferri "ABEL MATUTES", para cuando este se encuentre atracado en un puerto poder usar gas natural en vez de diesel. Para ello se requiere la instalación de un tanque de 30m<sup>3</sup> de capacidad en la cubierta superior y un motor de ROLLS ROYCE. Está previsto que los trabajos comiencen en el presente año y las primeras pruebas se hagan en Diciembre de 2015.[22] El motivo de este cambio en la generación es debido a la nueva legislación que está apareciendo, como las normas TIER que ya se explicarán más adelante en el apartado Fundamento Teórico.

### 2.3 BUQUES CON PROPULSIÓN MEDIANTE PILAS DE HIDROGENO.

Actualmente se llevan a cabo numerosas investigaciones para utilizar pilas de hidrogeno, que producen electricidad usada para mover los propulsores del buque. Existen algunos barcos equipados con esta tecnología como embarcaciones de recreo veleros o lanchas. Pero como ya se ha comentado anteriormente no se trataran ejemplos de embarcaciones de recreo. Dentro de los barcos mercantes existe un ferri utilizado en Hamburgo para hacer rutas turísticas por los canales y el lago Alster. El "*FCS ALSTERWASSER*", que así es como se llama dicho ferri nació como la idea de la ciudad de Hamburgo por reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Dicha ciudad tiene una larga experiencia en el uso de energías renovables, por ejemplo desde 2003 algunos de los autobuses de la ciudad, seis concretamente, utilizan pilas de hidrogeno como combustible.[23]

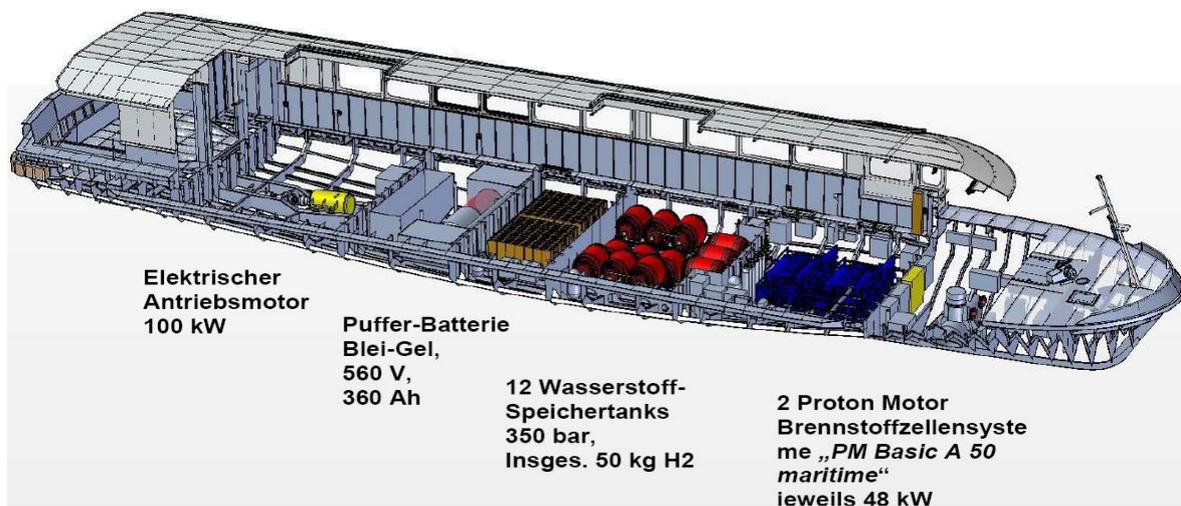


Figura 8. Esquema del sistema de propulsión y generación eléctrica del "*FCS ALSTERWASSER*".[24]

El "*FCS ALSTERWASSER*" nació gracias al proyecto ZEMSHIPS, donde numerosas empresas e instituciones, como la universidad de Ciencias Aplicadas de Hamburgo, se aliaron para crear un barco de cero emisiones y el sistema que abastece al barco del hidrogeno necesario. El proyecto comenzó en enero de 2007, en enero de 2008 se puso la quilla y en los meses siguientes el sistema de propulsión con hidrogeno. En agosto de 2008

se hizo la botadura y en 2009 se entregó a su operador ATG para que empezara a navegar en situación real.[25]

Este ferri está construido en aluminio y pesa 72 toneladas cargado completamente, tiene una eslora de 25,46m y puede transportar hasta 100 pasajeros en su única cubierta. Los diseñadores de PROTON MOTOR diseñaron el buque para poder cumplir todas las normas de seguridad de la GERMANISCHER LLOYD. Así la sala de máquinas se hizo en varios espacios estancos para poder aislar el hidrógeno de otras zonas.[26]



Figura 9. "PM Basic A 50 maritime" célula de combustible diseñada por PROTÓN MOTOR instalada a bordo del "FCS ALSTERWASSER".[27]

El "FCS ALSTERWASSER" posee dos pilas de combustible PROTON MOTOR "PM Basic A 50 maritime" que generan cada una 48kW de potencia máxima, la eficiencia de este equipo es de un 50% superando a cualquier motor de combustión interna. Con estas dos pilas se da la energía necesaria para propulsar el barco, con un motor de 100kW de corriente continua, manipular los equipos etc. Además se cargan siete baterías, Lead-gel, que dan 560V a 360Ah con lo que se puede usar cuando las pilas de combustible no estén en uso. El hidrógeno se almacena en tanques a 350bar y a 15°C con una capacidad de 50kg, no se puede conocer el volumen que ocupa ya que no se dispone del peso específico de

hidrogeno a esa presión y temperatura, siendo necesario repostar hidrogeno cada dos o tres días.[28]

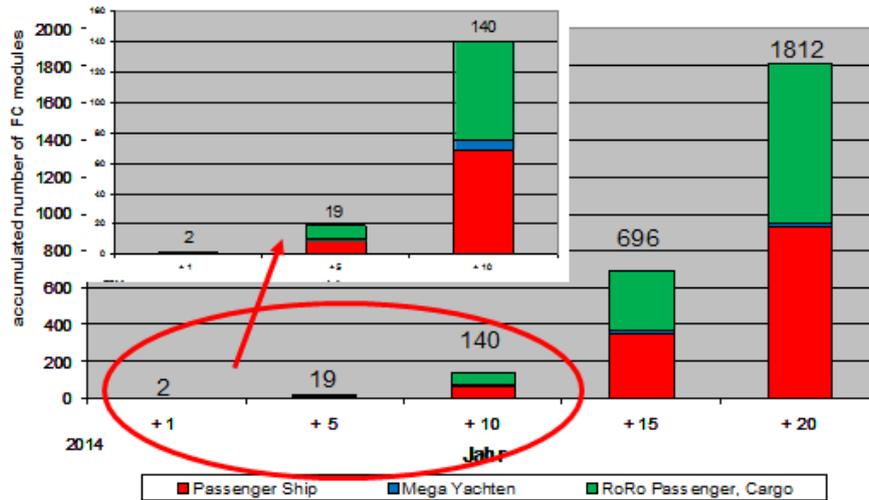


Figura 10. Previsión del uso de pilas de hidrogeno de 500kW para buques de pasajeros (rojo) mega yates (azul) y barcos RO-RO o RO-PAX.[29]

Los posibles usos de este tipo de combustible serán o no convenientes en función de la potencia del buque en el que se vaya a instalar. Entre el año 2010 y el actual 2015 se han hecho investigaciones para usar células de combustible para potencias de 250 a 500kW, de 2015 a 2020 se harán los primeros pedidos. Y durante los siguientes cinco años se establecerán en el mercado marítimo mundial, usándose en cualquier tipo de buque.[30]

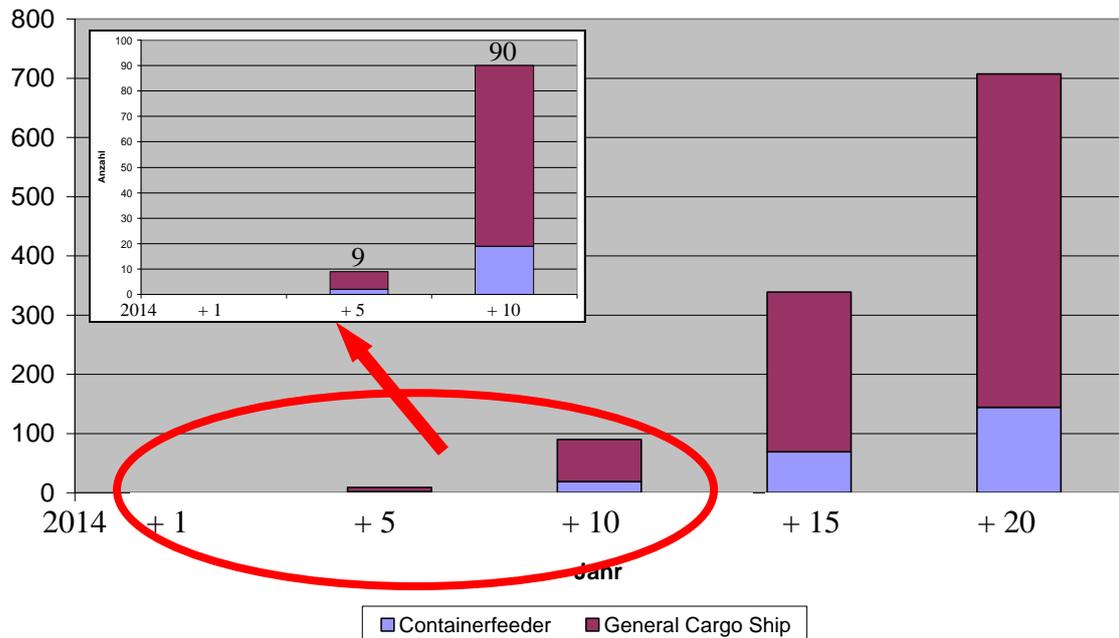


Figura 11. Número de células de combustible de pequeño potencia (250kW) que habrá en determinados años para barcos porta contenedores pequeños (lila) y barcos de carga general (magenta). [i.e en el texto escrito de donde se obtiene la imagen son buque multipropósito no carga general]. [31]

### 2.3.1 MALA PUBLICIDAD DE LOS SISTEMAS QUE USAN HIDRÓGENO.

Debido a un incendio que se produjo en las baterías del "FCS ALSTERWASSER" la mala publicidad sobre el uso del hidrogeno aumento considerablemente, aunque el incendio no produjera victimas. El incendio se produjo por causas ajenas a las pilas de hidrogeno y demostró que la seguridad funcionó, a pesar del fuego las pilas y el hidrogeno no fueron alcanzados. Antes de que el incendio se desarrollara el sistema de hidrogeno fue completamente aislado por los sistemas de seguridad. [32]

En la actualidad se continúan desarrollando numerosos proyectos que pueden permitir la implantación de las pilas de hidrogeno como una tecnología económica, respetuosa con el medio ambiente y segura.

## 2.4 BARCOS MULTIPROPÓSITO HÍBRIDOS DIESEL-ELÉCTRICOS PERO A VELOCIDAD VARIABLE.

A día de hoy existen dos buques con esta característica, el "*DINA STAR*" y el "*EDDA FERD*", ambos no son remolcadores propiamente dichos, son dos buques multipropósito. Estos tipos de barcos se encargan de abastecer a las plataformas marítimas, suministran todos los materiales que son necesarios, víveres e incluso hacen cambios de tripulación de la plataforma, incluso pueden hacer labores de remolque o de rescate. Debido a las numerosas funciones que realizan pueden necesitar estar en un mismo punto, sin moverse, sin desviarse para poder realizar la tarea encomendada. Por eso generalmente van equipados con un sistema llamado Posicionamiento Dinámico, que les permite mantenerse en dicho punto, debido a esta característica son muy adecuados para utilizar una propulsión híbrida.

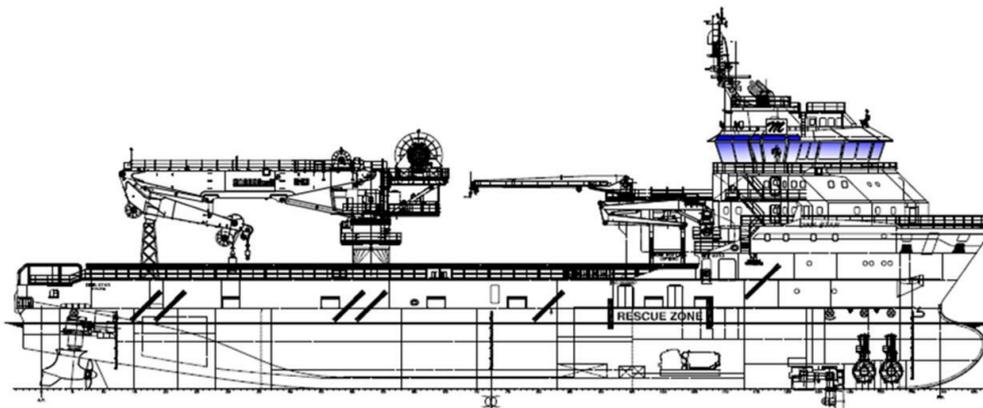


Figura 12. Esquema del "*DINA STAR*", donde se puede observar que no hay sistemas mecánicos de por medio, para la propulsión.[33]

Con el paso del tiempo la tecnología ha ido avanzando a pasos agigantados, por ejemplo la multinacional alemana SIEMENS creó en su día los convertidores de frecuencia Masterdrive y Bluedrive, como ya han sido citados anteriormente. Dichos convertidores se utilizan en buques híbridos cuyos generadores eléctricos trabajan a unas revoluciones constantes generando corriente alterna. SIEMENS ha continuado con la investigación hasta

desarrollar los nuevos convertidores Bluedrive Plus C que permiten la generación eléctrica a velocidades variables. Esta innovación supone una gran ventaja ya que dependiendo de la demanda de energía se puede adaptar la producción de la misma. Sin la velocidad variable los generadores no pueden trabajar en un rango menor y producir menos electricidad, la única solución es desacoplar generadores para adecuar el consumo eléctrico lo máximo posible a la producción. Con la velocidad variable no es necesario ya que se puede adaptar el consumo de energía a la producción de la misma variando la velocidad de cada generador.[34]

El "*EDDA FERD*" es un buque multipropósito de la empresa noruega OSTENSJO, es el primero en el mundo en utilizar una generación eléctrica a velocidad variable. Para ello cuenta con dos generadores eléctricos SIEMENS de 2222kW y otros dos generadores, también SIEMENS, de 3333kW. Estos equipos producen la electricidad que el buque necesita para la propulsión y para los demás servicios de a bordo. La propulsión la generan dos acimutales de la marca Voith Schneider de 2700kW cada uno, además tiene tres hélices transversales de proa para las maniobras. Dos de ellas son de la marca FP y tienen una potencia de 1400kW y la particularidad de estar diseñadas para reducir las vibraciones, y la más pequeña es de la marca RIM y tiene 800kW de potencia.[35]

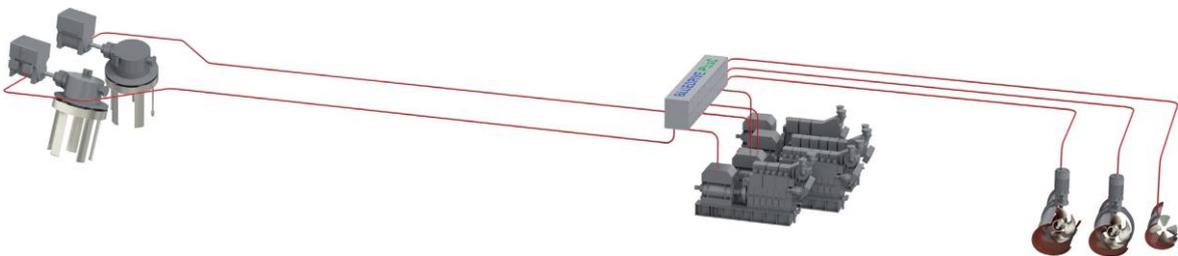


Figura 13. Esquema de propulsión del "*EDDA FERD*".[36]

Pero la principal particularidad de este buque radica en los convertidores de frecuencia que le permiten generar electricidad a velocidad variable, siendo una novedad en el mundo marítimo. Los principales beneficios que presenta son los siguientes:

- Reducción de las emisiones de efecto invernadero.

-Reducción de consumos.

-Reducción del coste de mantenimiento de los motores diesel, alargando su vida útil especialmente en motores rápidos.

-Reducción del volumen, peso (hasta un 30% menos) y espacio del sistema eléctrico, además de hacerlo más efectivo.

-No son necesarios los transformadores.[37]

Los convertidores permiten variar la velocidad de cada motor, independientemente, variando así la cantidad de electricidad producida. Esto permite adecuar el consumo que haya en cada momento a una producción más ajustada. El sistema de control adecua la velocidad al punto de trabajo más óptimo del generador, asegurando así que los generadores diesel trabajan en el punto de menor consumo específico (g/kWh). El generador síncrono está diseñado para trabajar a las velocidades del generador diesel. Esto es posible gracias a que el sistema Bluedrive Plus C que incluye todos los componentes, desde los generadores diesel, los generadores asíncronos, los convertidores de frecuencia para todos los equipos hasta los paneles de control, todo está diseñado en conjunto. Todo este conjunto está controlado por el sistema de control que recibe solo potencia activa de los generadores evitando así que no haya recirculación de potencia reactiva.[38]



Figura 14. Baterías de litio a bordo del "*EDDA FERD*".[39]

El sistema Bluedrive Plus C permite que se pueda conectar a la corriente de tierra, la que proporciona el puerto u otro buque o una estación marítima, sin importar que haya diferencias en los voltajes y frecuencias. Además si el barco ha estado operando con las baterías, comentadas a continuación, se pueden recargar mientras el buque permanezca conectado a tierra. También cabe destacar que el "*EDDA FERD*" puede operar con la energía acumulada en las baterías instaladas a bordo, siendo usadas en momentos de baja carga o incluso cuando hay picos de carga y no se quiere poner en marcha el generador que está en stand-by.[40] Las baterías son de la marca CORVUS, tienen tecnología de litio con una capacidad de 6,5kWh cada conjunto, el "*EDDA FERD*" posee 52 conjuntos de baterías con lo que tiene una potencia instalada de 338kWh con una tensión de 700V en CC.[41]



### **3. OBJETIVOS.**

La meta de este Trabajo Fin de Grado es la realización de un estudio comparativo de un remolcador portuario con una propulsión diesel mecánica y un remolcador portuario con una propulsión híbrida. Con esta comparación se quiere observar si para las condiciones de trabajo de un remolcador portuario es más rentable la propulsión diesel tradicional, la que ya tiene o la propulsión híbrida, la nueva propuesta. Durante el trabajo no se harán menciones a otras características como pueden ser la estabilidad o la disposición de la cámara de máquinas. Ya que el objetivo principal es el estudio de la hibridación.

Los objetivos que comprende este trabajo son dos fundamentalmente, estos dos puntos son la reducción de los consumos de combustible y contribuir a la mejora del medio ambiente reduciendo las emisiones de efecto invernadero. Respecto a la reducción de los consumos, se pretende usar menos cantidad de combustible para operar el remolcador. E incluso utilizar un combustible distinto al diesel, como puede ser el gas natural o una combinación de los dos. Respecto al medio ambiente se pretende lograr que el buque contamine lo menos posible reduciendo las emisiones de efecto invernadero. Para ello usar otro combustible como el gas natural contribuirá a disminuir las emisiones, además del hecho de usar menos combustible también ayudará en la consecuencia de este objetivo.

Respecto al uso del gas natural, como ya se ha comentado anteriormente, queda mencionado que podría ser una alternativa bastante interesante, pero las complicaciones técnicas que implica son extremadas. Se entiende por complicaciones técnicas al hecho de que habría que variar completamente el diseño del remolcador, para poder adaptarlo al uso del gas natural y a la normativa vigente respecto a la seguridad.

Se estudiara como afectan cada uno de ellos en cuatro circunstancias de trabajo del remolcador:

- Maniobras.
- Navegación.
- Espera/Stand-by.
- Amarrado al muelle.

Las maniobras se consideraran entre el tiempo en el que se entrega el cabo al buque que va a ser remolcado; y el instante en el que se devuelve el cabo. Asimismo se consideran maniobras cuando el remolcador empuja al barco que está siendo movido. Este tiempo es el que se apunta en el diario de abordaje o en el diario de máquinas como maniobra, desde la hora de inicio de maniobra hasta el fin de maniobra. La navegación se refiere al periodo desde que sale de la base, ya sea atracado a un muelle o amarrado a una boya, hasta que llega a la zona de maniobra. El tercer caso de estudio es cuando el remolcador está en espera, se considera este periodo al que va desde cuando el remolcador llega a la zona de la maniobra y da el cabo al barco que va a maniobrar. El último caso son los que tienen que ver cuando el remolcador está esperando a que le avisen para acudir a una maniobra. El primer caso es el de amarrados al muelle, se considerara el tiempo que el remolcador pasara hasta que tenga que realizar una maniobra.

Hay una última circunstancia de trabajo que no se estudiara desde estos dos puntos de vista y es el de amarrado al muelle, pero con toma de tierra. que consiste en estar amarrado al muelle pero conectado a tierra, no hay mucho que decir simplemente que no se utilizan ningún generador de abordo la electricidad la proporciona el puerto a través de un cable. Esta circunstancia se estudiara desde un punto de vista económico, observando cuanta electricidad consume antes y después de la hibridación, para después multiplicarla por el precio del kW/h y así tener el consumo diario en euros de esta circunstancia.

#### **4. FUNDAMENTO TEÓRICO.**

En este apartado se van a tratar los dos aspectos principales desde un punto de vista teórico. Se va a explicar porque estos dos puntos, emisiones y consumos, son los elegidos para poder realizar todo el estudio comparativo. Además de un tercero que tiene una enorme influencia sobre los otros, como es los tiempos que pasa el remolcador trabajando en cada una de las situaciones comentadas ya en el apartado Objetivos.

Cabe destacar que no hay una regulación sobre la reducción del consumo de combustible o Los tiempos que trabaja el remolcador en cada circunstancia, pero estas dos condiciones afectan notablemente a la reducción de emisiones sobre la que si hay una regulación.

##### 4.1 REDUCCIÓN DE EMISIONES.

La organización marítima internacional (OMI o por sus siglas en inglés IMO) se ha encargado desde sus orígenes a la seguridad de la vida humana en la mar, primer convenio SEVIMAR (Seguridad de la Vida Humana en la Mar). Con el paso de los años no solo se ha preocupado de la seguridad de las personas sino también de la seguridad del medio ambiente. Evitando la proliferación de la contaminación que generan los buques a través de: aguas de lastre, emisiones de los equipos, tratamiento de residuos etc. El caso que se trata en este Trabajo Fin de Grado es el de la reducción de las emisiones.

Las primeras consideraciones que la IMO tomo para reducir la contaminación que los buques fue la entrada en vigor del convenio MARPOL (por sus siglas en inglés) Convenio para la Prevención de la Contaminación de los Barcos. Fue ratificado en 1973 y enmendado en dos ocasiones en 1978 y la ultima en 1997, en los dos casos para añadir nuevos protocolos. El convenio fue firmado para evitar la contaminación por derrames a la mar en accidentes, principalmente, pero actualmente cuenta con todas los tipos de contaminación que puede generar un buque. Además existen convenios aparte de

MARPOL, para evitar la contaminación por otras causas, como el Convenio para la Prevención de Contaminación Marina por Arrojar Basuras y Otros de 1972, o el Convenio para el Control y Manejo de Aguas de Lastre y Sedimentos del año 2004.[42]

El anexo que trata la contaminación atmosférica que generan los buques, las emisiones, es el Anexo VI, que marca los límites de  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$  y las zonas en las que están permitidos o no permitidos ser expulsados a la atmosfera. Además cuenta con un capítulo extra, introducido en 2011, para comenzar a tomar medidas para la reducción de gases de efecto invernadero, para hacer un uso más eficiente de la energía desde un punto de vista técnico y de operación.[43]

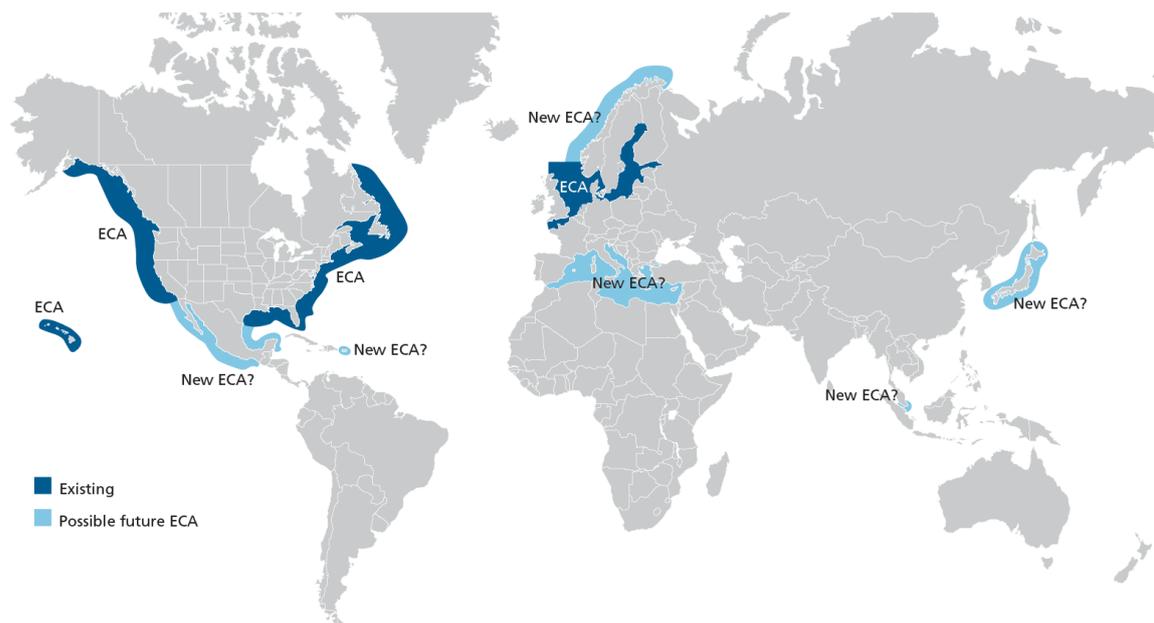


Figura 15. Zonas ECA actuales en azul oscuro y zonas ECA que entran en vigor en 2016 en azul cielo.[44]

Las medidas llevada a cabo para la reducción de las emisiones contaminantes son los protocolos establecidos dentro del Anexo VI conocidos como TIER, que son propiamente quienes fijan los límites de emisiones. Las zonas limitadas se conocen por las siglas en inglés ECA (Emission Control Areas/Aéreas de Control de Emisiones), y son los lugares donde las limitaciones respecto a  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$  se aplican. Los TIER se establecieron en 1997

en el ya mencionado Anexo VI, cuando se diseñó el TIER I, en 2005 el MEPC (por sus siglas Marine Environment Protection Committee/Comité Marítimo de Protección del Medio Ambiente) se reunió para fijar unos límites más restrictivos. Después de tres años de reuniones el MEPC acordó un nuevo TIER, llamado TIER II que entró en vigor en Julio de 2010 además de aprobar las ECAS.[45]

Los principales cambios que se dieron durante esta revisión son los siguientes se reduce la cantidad de sulfuros del 3,5 al 0,5% a partir del 2020; y dentro de las zonas ECA se reduce al 0,1% a partir del 1 de Enero de 2015. Se adapta el TIER II, respecto a las emisiones de óxidos de nitrógeno, para todos los barcos construidos antes o en 2011 y se aplicara el TIER III dentro de las ECA para todos los barcos construidos antes o en 2016. Además el TIER I queda de la siguiente forma todos los barcos construidos entre 1990 y el año 2000, que lleven un método de reducción de emisiones aprobado para esos motores, deberán cumplir con el TIER I. En todos los casos se refiere a barcos que tengan más de 130kW de potencia medidos en la salida del eje.[46]

Con lo que la regulación respecto a los NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub> queda de la siguiente forma:

NO<sub>x</sub>:

-TIER I: Para barcos construidos antes o en el 2000.

N<130: 17 g/kWh. N=130-1999:  $45 * N^{(-0.2)}$  g/kWh. N ≥ 2000: 9,8g/kWh.

-TIER II: Para barcos construidos antes o en el 2011.

N<130: 14,4 g/kWh. N=130-1999:  $44 * N^{(-0.23)}$  g/kWh. N ≥ 2000: 7,7g/kWh.

-TIER III: Para barcos construidos antes o en el 2016.

N<130: 3,4g/kWh. N=130-1999:  $9 * N^{(-0.2)}$  g/kWh. N ≥ 2000: 2g/kWh.

Donde n es la velocidad del motor.[47]

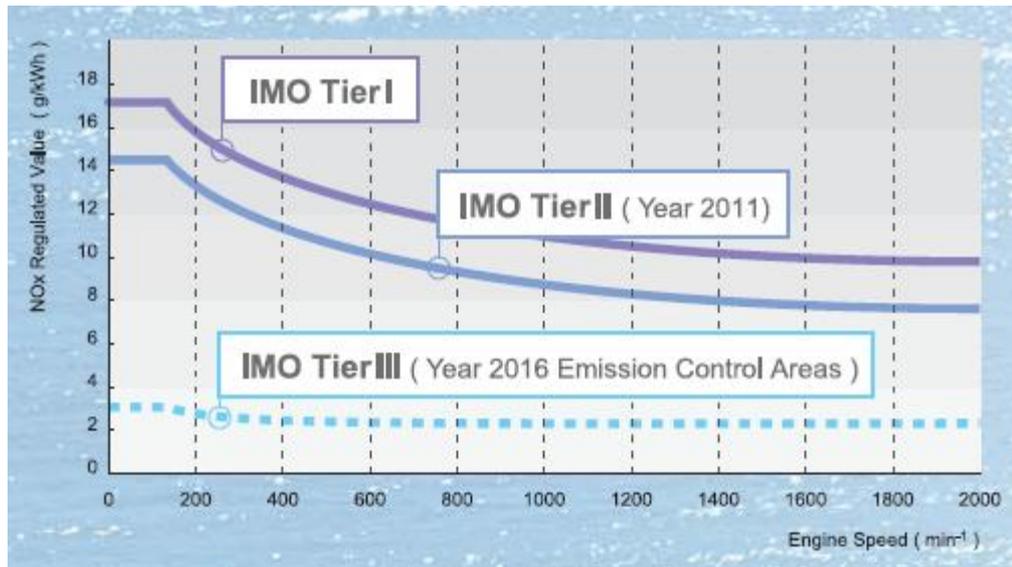


Figura 16. Grafica de límites de la norma TIER I, II y III. En el eje horizontal las revoluciones del motor y en el vertical el flujo de NO<sub>x</sub>. [48]

SO<sub>x</sub>:

Fuera de los límites de las zonas ECA:

4,5% m/m antes del 1 de Enero de 2012.

3,5% m/m en él y después del 1 de Enero de 2012.

0,5% m/m en él y después del 1 de Enero de 2020. Aunque podrá variar según la disponibilidad de combustibles fósiles.

Dentro de los límites de las zonas ECA:

1,5% m/m antes del 1 de Enero de 2010.

1% m/m en el y después del 1 de Enero de 2010.

0,1% m/m en él y después del 1 de Enero de 2015. [50]

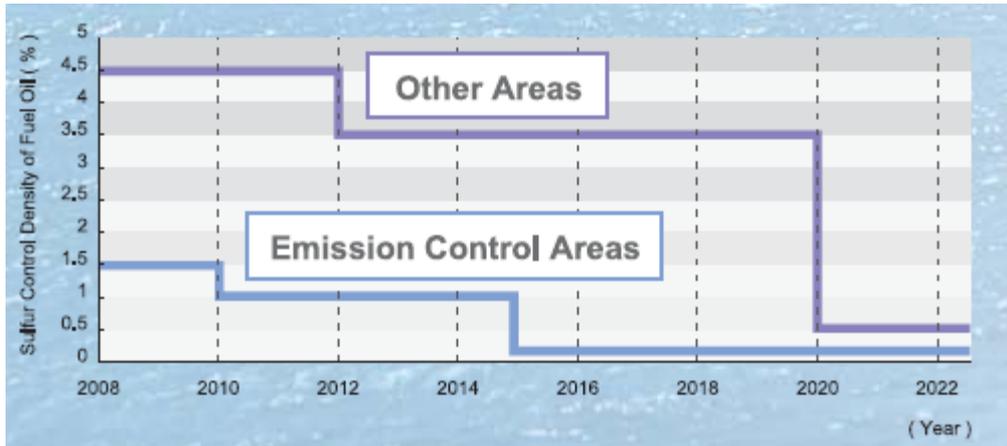


Figura 17. Grafica de los límites de SO<sub>x</sub> en las zonas ECAs y fuera de las mismas. En el eje horizontal los años y en el vertical el porcentaje de SO<sub>x</sub>. [49]

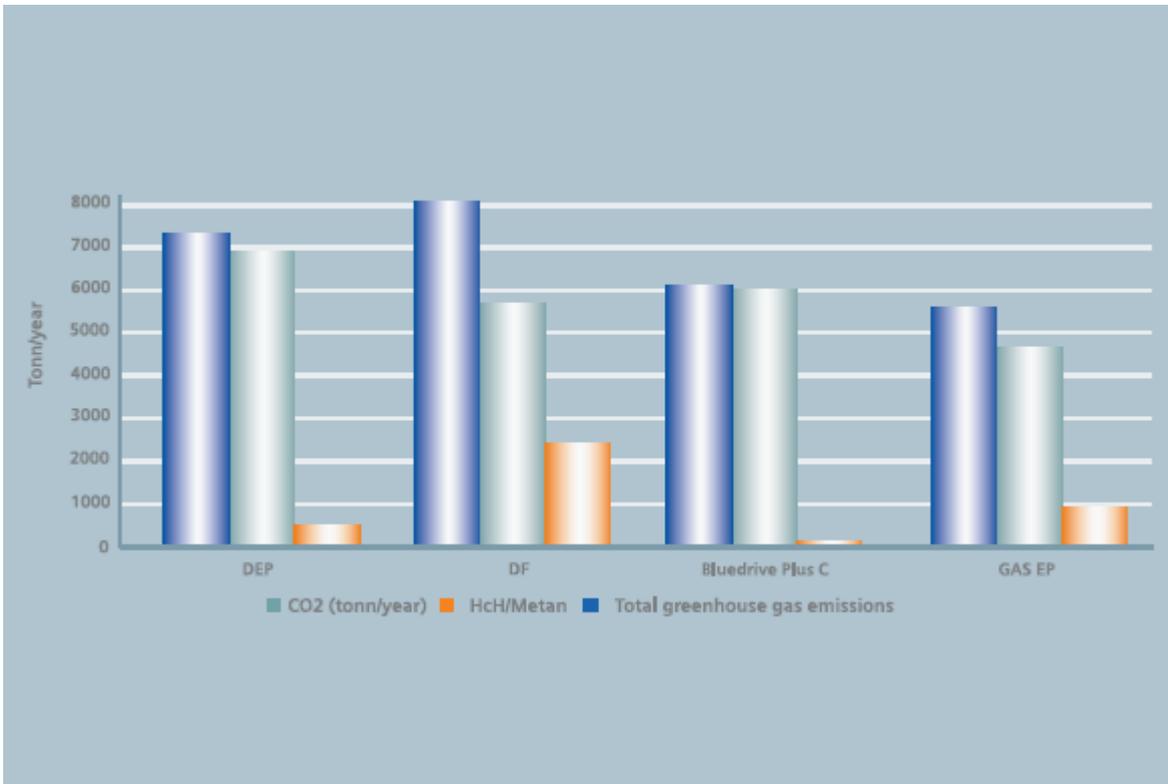


Figura 18. Grafico que compara las emisiones tanto de CO<sub>2</sub>, Metano y las totales de efecto invernadero en un año, con respecto a otros clases de buques. [51]

Como ejemplo de reducción de emisiones se puede observar la figura 18, en la que se observan distintos tipos de emisiones, medidos todos en toneladas al año, para distintos tipos de buques. Así se diferencian emisiones para el sistema de BlueDrive Plus C, sistema explicado en el apartado Estado del Arte, que es el que menos metano expulsa y el tercero que menos CO<sub>2</sub>. Además se tienen los buques que utilizan generadores dual fuel, DF, produciendo a velocidad constante, que son los que más contaminan. Los clásicos buques DEP cuyos generadores diesel eléctricos producen también a velocidad constante, que son los segundos que más gases expulsan. Y por último están los GAS EP que utilizan generadores accionados por gas y como los otros dos producen a velocidad variable y son los que menos emisiones producen.

Este es uno de los objetivos de este Trabajo Fin de Grado que ya se ha comentado antes y como se verá más adelante, se comprobará si haciendo la hibridación se reducen o no las emisiones de gases contaminantes y de efecto invernadero.

#### 4.2 REDUCCIÓN DE CONSUMOS Y TIEMPOS DE TRABAJO.

Respecto a la reducción de consumos y los tiempos de trabajo del remolcador no hay un marco teórico concreto, así como en la reducción de las emisiones si hay una legislación que todos los buques deben de cumplir. Esta es la razón por la que estas dos características se comentan en un mismo apartado, ambas dos están en este apartado porque afectan directamente a la reducción de las emisiones. Y como ya se ha mencionado intentar reducir los consumos de combustible es uno de los objetivos de este Trabajo Fin de Grado, además el número de horas que el remolcador pase en una circunstancia de trabajo o en otro influye notablemente.

Desde un punto de vista teórico la comparación, el TFG en sí mismo es un fundamento teórico ya que durante la realización del mismo se comprueba que los consumos de combustible se reducen. por esta razón la comparación es un fundamento teórico, haciendo el trabajo se tiene el conocimiento de que los consumos se reducirán, pero el hecho de

hacerlo y verlo comprobado es una prueba en sí misma. Aun así para aclarar más este punto se estudia en los siguientes párrafos un caso concreto.

Para poder explicar de forma clara como afectan se va a estudiar un caso concreto, que es el del "EDDA FERD", que ya ha aparecido en el apartado Estado del Arte y en este mismo apartado para explicar la reducción de emisiones. A continuación hay dos figuras, en la figura 19 se observa una grafica en la que se pueden ver los consumos de diesel por toneladas al año de distintos tipos de barcos. Dichos tipos ya han sido explicados más arriba. Como se observa el que menos combustible utiliza es el sistema Bluedrive Plus C, ya que al producir electricidad a velocidad variable consigue un ahorro de 900 toneladas más o menos. Por lo que todo este combustible no utilizado repercute en menores emisiones de gases de efecto invernadero. Evidentemente los buques GAS EP no consumen diesel pero para poder compararlos dentro de la grafica se hace una equivalencia, por eso el consumo de diesel que corresponde a los GAS EP es una equivalente.

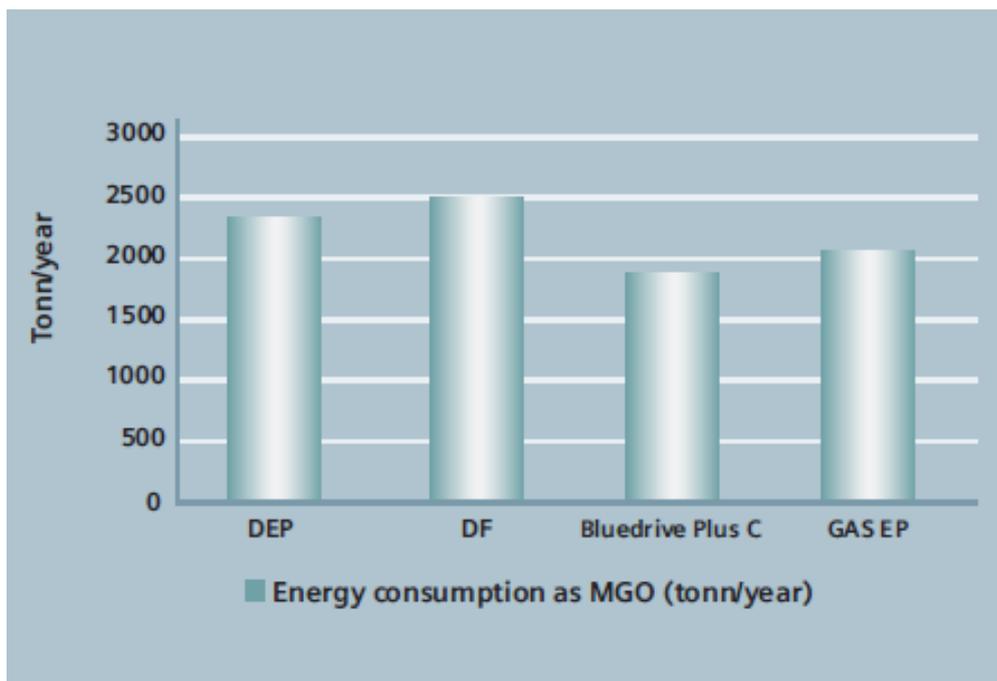


Figura 19. Grafico que compara los consumos de diesel para cada una de las clases de barcos.[52]

En la figura número 20 se ven las horas que pasa el buque en las distintas condiciones de trabajo.

Transit: cuando esta navegando de un punto a otro.

Manouvering to/from rig: cuando esta maniobrando en la plataforma.

Manouvering harbour: cuando hace las maniobras en el puerto.

Alongside terminal: cuando está amarrado en la terminal, amarrado al muelle.

Waiting offshore: cuando está esperando ordenes en alta mar.

DP: cuando está usando el sistema de Dynamic Positioning Posicionamiento Dinámico.

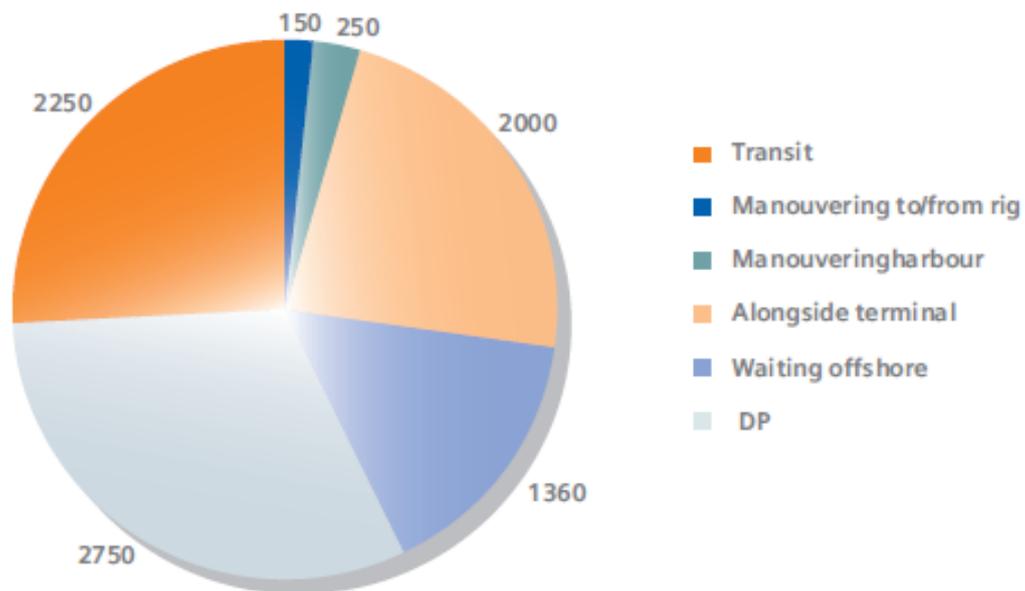


Figura 20. Grafico que compara las horas que está en un año el buque multipropósito "EDDA FERD" en cada una de las circunstancias de trabajo.[53]

Debido a que pasa más tiempo en unas condiciones que en las otras, la forma en que la potencia eléctrica se produce varía enormemente. Así cuando esta navegando desde su

puerto base a la plataforma necesita más potencia que cuando está amarrado en la terminal del puerto. Por lo que no puede ser la misma forma de producir dicha potencia ya que el gasto de combustible y las emisiones de gases serían muy elevadas. En este caso se hace mediante la velocidad variable y el uso de baterías, además de la conexión a tierra durante el tiempo que está amarrado al puerto, por lo que se puede controlar de una forma más eficaz cuanto combustible se usa. Por ejemplo si se está en la condición DP usando un solo generador y se requiere más potencia en un periodo corto de tiempo, se pueden usar las baterías para absorber ese pico. Y más tarde cuando halla energía de sobra se recargan las baterías, ahorrando así combustible y por lo tanto reduciendo las emisiones.



## **5. METODOLOGÍA.**

En lo que respecta a los métodos que se han seguido se pueden distinguir varias fases durante todo el proceso de realización de este Trabajo Fin de Grado. Estas dos fases son las siguientes: la primera de ellas es la toma de datos y la investigación y la segunda es la comparación. Se han colocado en este orden porque es como se han realizado cronológicamente, primero recabar y estudiar los datos y luego compararlos.

La primera comprende todo el periodo de toma de datos y análisis de los mismos así como la búsqueda de información para realizar la comparación. Se realizó en primer lugar la toma de datos, para ello se aprovechó los días de mar realizados en un remolcador en el puerto de Santurce. Durante estos días se anotaron todos los datos para cada una de las situaciones de trabajo mencionadas en los objetivos, consumos eléctricos y de combustible, se anotaron en más de una ocasión para que fueran más exactos. El siguiente paso fue la toma de datos de los equipos que tienen importancia en este Trabajo Fin de Grado, como los motores principales y los motores auxiliares. Dichos datos se obtuvieron de los manuales disponibles a bordo así como de las propias placas que están sobre los equipos.

Posteriormente se ordenaron dichos datos, se hicieron las medias de los tiempos de trabajo del remolcador, de los consumos de combustible y de los consumos eléctricos. Respecto a los datos obtenidos de los manuales y demás documentación obtenida a bordo, como los certificados de emisiones de los motores, se pasaron a unidades del S.I y se interpretaron. En esta primera fase también se realizó toda la búsqueda de información para la realización de la comparación. Búsqueda de proyectos similares de hibridaciones para el apartado Estado del Arte, búsqueda de legislación sobre emisiones para el apartado Fundamento Teórico y búsqueda de motores eléctricos y de combustión interna y de baterías para poder hacer la comparación.

La segunda fase del proyecto es propiamente el estudio comparativo entre las dos situaciones, situación previa a la hibridación y posterior a la hibridación. Para esta fase se

extraen resultados de los datos obtenidos en el remolcador, además se calculan en algunos casos los nuevos datos con la hibridación y los resultados se comparan entre ellos. Principalmente se hacen cálculos de medias para que los datos sean más exactos, además se hacen graficas de los datos obtenidos como ya se hiciera previamente con los datos del remolcador. La comparación es propiamente enfrentar los datos obtenidos de las dos situaciones y ver en qué casos resulta más favorable la hibridación, teniendo en cuenta varios factores. Por ejemplo en la hibridación puede que durante el tiempo de espera/stand-by se pueda obtener la energía de unas baterías, pero si cuando se cargan las baterías se consume más energía que cuando está en el tiempo de espera/stand-by, en el caso no hibrido, no se está reduciendo las emisiones y los consumos. Con lo que no se está cumpliendo el objetivo.

## **6. DESARROLLO.**

Como ya se ha comentado el objetivo principal es hacer una comparación entre los dos sistemas de propulsión, el actual, diesel mecánico y el de estudio, una propulsión híbrida. Esta comparación se hará desde el punto de vista de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y de la reducción de consumos de combustible. En este apartado se van a estudiar las cinco condiciones o circunstancias de trabajo explicadas más arriba en el apartado Objetivos. Para ello lo primero es describir el remolcador y como son los dos tipos de propulsión, el que actualmente tiene el buque y el de estudio.

### 6.1 CARACTERÍSTICAS DEL REMOLCADOR.

El remolcador portuario es un del tipo Voith Water Tactor, denominado así debido a su sistema de propulsión Voith, fue construido en el año 2012 en los astilleros Armon, Gijón. Posee las siguientes características:

- Una eslora de 33,58 metros.
- Una manga de 13,6 metros.
- Un calado de 7,09 metros.
- Una potencia de 7080C.V con sus dos motores de GENERAL ELECTRIC.
- Una capacidad de tracción desde un punto fijo de 80,62 toneladas.
- Equipado para la recogida de vertidos de aceites o combustibles (Oil Recovery Ship)
- Un desplazamiento de 519 toneladas.[54]
- Dos cañones FIFI Clase N°1 con una capacidad, cada uno de ellos, de 1200m<sup>3</sup>/h de agua y 300m<sup>3</sup>/h de espuma, alcanzando una distancia de 130m a una presión de 12 bares.[55]

### 6.1.1 MOTORES PRINCIPALES.

Respecto a los motores tiene dos motores principales de la empresa GENERAL ELECTRIC, dos auxiliares de la empresa CATERPILLAR y un auxiliar de puerto de la misma compañía. Como ya se ha dicho los MM.PP tienen una potencia de 7080C.V o 5280kW a 1000 r.p.m. cada uno de ellos con 3540C.V. Los MM.PP son el modelo 16V228MDF, lo que quiere decir que tienen 16 cilindros en V, con un volumen de 10,95 litros y una presión máxima de 19,9 bares. Son motores de 4 tiempos con dos turbo compresores, uno para cada rama de la V y refrigerados por agua. Además cada uno de los cilindros tiene un diámetro de 228,6 milímetros y una carrera de 266,7 milímetros de longitud.[56]

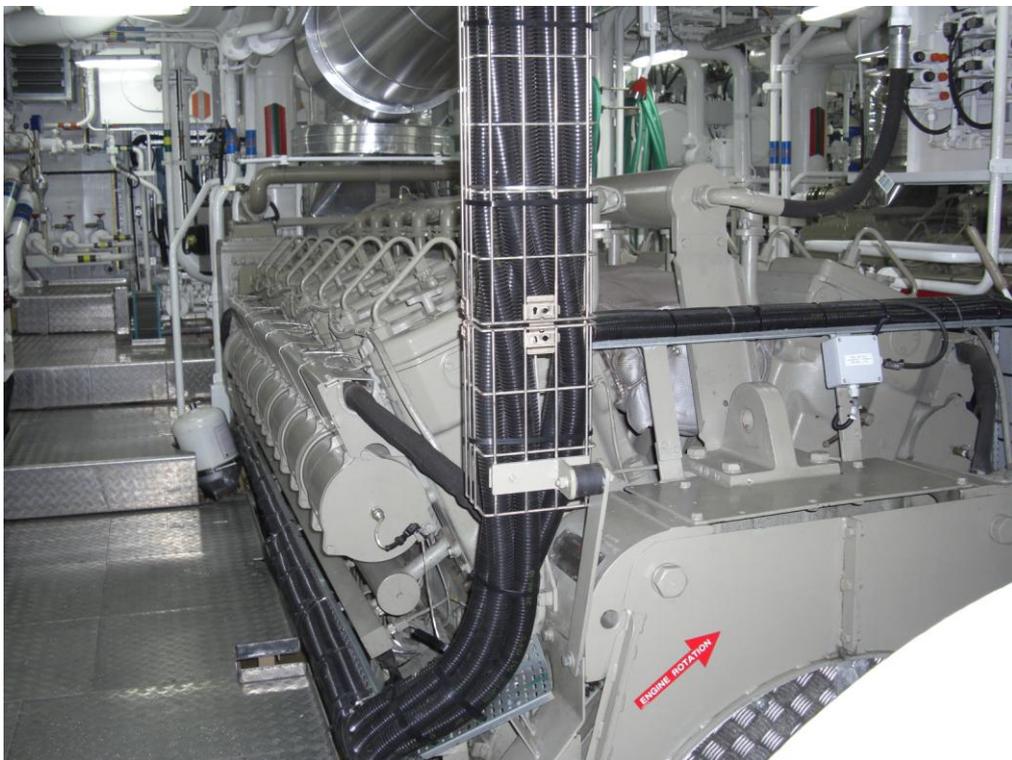
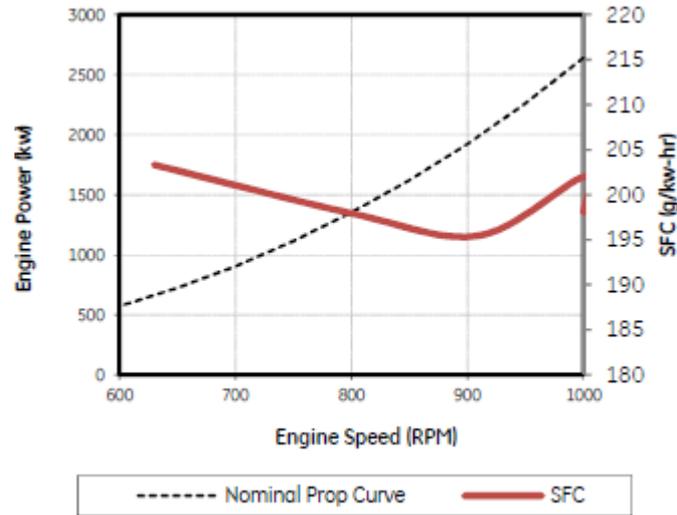


Figura 21. Motor Principal visto de proa a popa del remolcador portuario tomado como referencia para el estudio.[57]

Respecto a los consumos del motor cabe decir lo primero de todo que utiliza un tipo de combustible No. 2 Diesel ASTM D-975 y que además cumple con el estándar de emisiones

IMO II. El consumo de diesel en una hora, a 1000 r.p.m. y dando la máxima potencia 100% de la carga, es de 598 litros, teniendo en cuenta además que todas las bombas necesarias para su funcionamiento y acopladas al motor están en marcha.[58] Respecto a las emisiones de gases se sabe que ambos motores cumplen con el TIER II impuesto por la IMO que fija unos límites de NO<sub>x</sub> de 9,2g/kW-h.[59]



Speed	% Engine Load	Power (kW)	Power (bhp)	BSFC (g/kW-hr)	BSFC (lbs/hp-hr)	Fuel Burn (l/hr)	Fuel Burn (gal/hr)
1000	110	2904	3894	198.0	0.325	644.8	170.6
1000	100	2640	3540	202.0	0.332	598.0	158.2
910	75	1980	2655	195.5	0.321	434.0	114.8
800	50	1320	1770	197.9	0.325	293.0	77.5
630	25	660	885	203.3	0.334	150.5	39.8

Figura 22. Grafica de la curva de consumo especifico de los MM.PP modelo 16V228MDF y la tabla explicativa.[60]

Mode		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Power/Torque	%	100/100	75/75	50/50	25/25	75/82	50/63	25/40	10/10	50/100	38/75	25/50	0/0
Speed	%	100	100	100	100	91	80	63	100	75	75	48	
Time at Beginning of Mode		9:49am	10:50am	11:04am	11:20am	10:03am	10:18am	10:35am	11:34am	11:49am	12:03pm	12:18pm	12:32am
<b>Ambient data</b>													
Atmospheric Pressure	kPa	97.19	97.19	97.19	97.19	97.19	97.19	97.19	97.19	97.19	97.19	97.19	97.19
Intake Air Temperature	°C	24.9	25.1	25.2	25.0	23.9	24.1	23.4	24.7	24.6	24.8	24.6	25.1
Intake Air Humidity	%	20	21	27	36	22	28	48	44	28	34	41	52
Relative Humidity of intake	%	36.97	35.65	35.10	35.02	37.69	38.8	37.91	34.58	35.25	34.28	34.56	33.95
Air temp at RH sensor	°C	76.9	77.1	77.3	77.0	75.0	75.4	74.2	76.5	76.3	76.7	76.3	77.3
Test Condition Parameter	$f_d$	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
<b>Gaseous emission data</b>													
NOx Concentration dry/wet	Ppm	782.33	594.63	547.10	273.37	733.72	826.60	1021.05	179.20	935.95	864.72	656.90	27.02
CO Concentration	Ppm	44.51	52.56	50.34	107.82	59.85	90.67	151.11	196.05	127.78	114.68	90.09	9.28
CO <sub>2</sub> Concentration	%	5.33	4.90	4.67	4.10	5.30	5.85	6.24	3.00	6.25	6.05	5.30	0.21
O <sub>2</sub> Concentration dry/wet	%	13.53	14.10	14.40	15.17	13.59	12.81	12.24	16.67	12.20	12.47	13.52	20.48
HC Concentration	ppmC	84.12	97.81	121.64	155.41	97.71	120.62	140.57	216.4	128.11	140.07	164.49	25.65
NOx Humidity cor. Factor	$k_{hd}$	0.963	0.961	0.960	0.959	0.957	0.961	0.954	0.956	0.957	0.956	0.955	0.958
Dry/wet Correction Factor	$k_{wr}$	0.940	0.944	0.946	0.951	0.941	0.935	0.993	0.961	0.933	0.935	0.941	0.987
NOx Mass Flow	kg/h	1810.4	11.52	7.53	2.51	12.62	8.93	5.13	1.25	9.05	6.68	4.11	0.33
CO Mass Flow	kg/h	0.649	0.845	0.439	0.629	0.655	0.620	0.484	0.872	0.786	0.564	0.359	.072
CO <sub>2</sub> Mass Flow	kg/h	1220.5	944.9	840.8	376.6	912.0	629.4	314.5	209.9	604.8	467.6	332.3	26.2
O <sub>2</sub> Mass Flow	kg/h	2255.7	1980.6	1437.3	1012.5	1701.4	1002.2	448.5	848.3	858.8	701.3	616.5	1818.6
HC Mass Flow	kg/h	0.647	0.631	0.556	0.473	0.564	0.437	0.239	0.497	0.419	0.365	0.346	0.100
NOx Specific	g/kWh	9.200	7.832	7.679	5.122	8.580	9.102	10.449	6.385	9.230	9.079	8.377	22.122

Figura 23. Tabla de emisiones de un motor principal para distintas cargas de trabajo.[61]

### 6.1.2 GENERADORES ELÉCTRICOS.

Por aclarar los términos, los auxiliares, los que producen energía eléctrica, serán denominados generadores y el resto de motores se les denominara motores. Los dos generadores tienen cada uno seis cilindros en línea que desarrollan una potencia de 230kW a 1000 r.p.m. a una presión de 21,6 bares. Además cada cilindro tiene un diámetro de 112 milímetros y una carrera e 149 milímetros de longitud, ambos están refrigerados por agua. Ambos son de la marca CATERPILLAR y son el modelo C9.[62] El generador de puerto es de la marca CATERPILLAR modelo C4.4 DITA con cuatro cilindros en línea que desarrollan una potencia de 93,6kW a 1500 r.p.m. Los cilindros tienen un diámetro de 105 milímetros y una carrera de 127 milímetros y también esta refrigerado por agua.[63]



Figura 24. Motor auxiliar o generador del costado de babor del remolcador portuario tomado como referencia para el estudio.[64]

Respecto a las emisiones de los generadores se encuentra en los manuales el certificado de emisiones de los generadores 1 y 2, por el contrario no hay del generador de puerto. Los generadores tienen un límite de emisiones de 7,70g/kW-h y cumplen al igual que los MM.PP la regla 13 del TIER II. Respecto a los consumos se encuentra en la misma tabla que se tiene en la figura 25, un consumo específico de 218,7g/kW-h. [65]

Mode		1	2	3	4	5	6	7	8
Power / Torque	%	100	75	50	10	100	75	50	0
Speed	%	100	100	100	100	Peak T	Peak T.	Peak T.	Low
Time at beginning of mode		13:14:1	13:16:0	13:28:4	13:41:0	13:54:3	14:06:5	14:17:5	14:28:1
<b>Ambient data</b>									
Atmospheric pressure	kPa	100.8	100.8	100.8	100.8	100.8	100.8	100.8	100.8
Intake air temp.	°C	25.0	24.6	24.8	25.3	25.2	25.4	25.6	26.3
Intake air humidity rel.	%	53.1	54.4	54.8	54.6	53.9	53.9	54.7	49.8
Atmospheric factor (fa)	-	1.000	0.998	0.999	1.002	1.001	1.002	1.004	1.007
<b>Gaseous emissions data</b>									
NOx conc. dry	ppm	791.0	372.4	265.3	162.9	932.7	658.6	601.1	221.9
CO conc. dry	ppm	121.71	85.27	80.86	138.60	57.93	65.89	413.89	104.45
CO2 conc. dry	%	8.71	7.27	5.58	3.09	9.44	8.31	7.69	1.90
O2 conc. dry	%	8.96	10.91	13.22	16.56	7.98	9.49	10.28	18.16
HC conc. wet	ppm	55.3	77.5	75.5	120.4	47.9	43.6	37.2	115.2
NOx hum. corr. factor		0.9986	0.9975	1.0005	1.0054	1.0025	1.0048	1.0089	1.0038
Dry/wet corr. factor		0.9160	0.9276	0.9413	0.9622	0.9098	0.9186	0.9231	0.9733
NOx mass flow	kg/h	2.114	0.975	0.608	0.211	1.853	1.130	0.745	0.067
CO mass flow	kg/h	0.198	0.136	0.113	0.109	0.070	0.069	0.310	0.019
CO2 mass flow	kg/h	222.9	182.5	122.2	38.1	179.0	135.8	90.3	5.5
O2 mass flow	kg/h	166.7	199.2	210.5	148.3	110.0	112.7	87.8	38.0
HC mass flow	kg/h	0.049	0.066	0.055	0.049	0.032	0.024	0.015	0.011
SO2 mass flow	kg/h	NA							
NOx spec.	g/kWh	6.937	4.245	3.965	6.716	7.232	5.850	5.787	27.354
<b>Engine data</b>									
Speed	rpm	2101.6	2101.7	2101.7	2101.6	1501.1	1501.9	1502	700.5
Auxiliary power	kW	NA							
Dynamometer setting	kW	NA							
Power	kW	304.8	229.8	153.3	31.4	256.2	193.1	128.7	2.5
Mean eff. pressure	bar	19.78	14.91	9.95	2.04	23.28	17.54	11.69	0.48
Fuel rack	mm	216.6	175.9	113.6	37.5	250.3	184.7	123.6	8.6
Uncorrected spec. fuel	g/kWh	227.2	247.4	248.7	382.3	218.7	221.8	222.2	661.2
Fuel flow	kg/h	69.24	56.84	38.12	12.01	56.04	42.84	28.60	1.62
Air flow	kg/h	1773.30	1728.00	1495.60	831.90	1317.30	1129.20	810.60	193.30
Exhaust flow (gexhw)	kg/h	1842.54	1784.84	1533.72	843.91	1373.34	1172.04	839.20	194.92
Exhaust temp.	°C	401.4	360.6	285.3	181.2	416.8	381.5	354.0	122.9
Exhaust back pressure	mbar	102.8	81.8	53.7	-0.1	54.2	28.3	0.2	-0.1
Cyl. coolant temperature out	°C	105.1	96.5	91.3	87.1	105.1	93.7	91.8	85.5
Cyl. coolant temperature in	°C	94.9	87.7	85.7	84.3	93.2	84.3	85.4	84.1
Charge air pressure	bar	2.36	2.20	1.72	0.49	2.40	1.86	1.05	0.009
Charge air temperature	°C	75.2	71.9	66.8	56.6	71.3	66.9	61.6	53.8
Charge air reference	°C	75.2	71.9	66.8	56.6	71.3	66.9	61.6	53.8
Inlet depression	mbar	-38.7	-36.8	-28.5	-10.1	22	-17.3	-9.6	0.1

Figura 25. Tabla de emisiones de gases de un generador, en rojo la columna que es de interés para el estudio ya que los generadores siempre trabajan a 1500 r.p.m.[66]

### 6.1.3 OTROS CONSUMIDORES DE ENERGÍA IMPORTANTES.

Además hay que mencionar que a los MM.PP van acoplados a una reductora en proa, para accionar los propulsores Voith y a popa llevan unas multiplicadoras para accionar las bombas. Estas dos bombas, dos en cada motor, sirven para mover el aceite hidráulico de la máquina de remolque y el agua para los cañones FIFI. Las bombas que suministran agua a los FIFI trabajan a 1800 r.p.m. con una potencia de 811kW.[67] Las bombas para mover el aceite hidráulico también operan a 1800 r.p.m. con una potencia de 165kW a una presión de 50 bares y un caudal de 1675l/min.[68] Más adelante se explicara porque estos datos son importantes para la realización de este Trabajo Fin de Grado.

### 6.2 TIPOS DE PROPULSIÓN Y GENERACIÓN ELÉCTRICA.

Los tipos de propulsión que se pueden elegir para hacer el trabajo ya se han explicado más arriba en el apartado Estado del Arte. Por lo que aquí solo cabe mencionar que el sistema elegido para someterlo a comparación es hibridación diesel-eléctrica con baterías. Se descartan el resto por las siguientes cuestiones:

-Híbridos con gas natural como combustible con o sin baterías: Porque instalar el sistema de contención del gas natural variaría enormemente el contenido de este estudio y se haría demasiado pesado. Teniendo que incluir modificaciones en la sala de máquinas para adaptarse a las cuestiones de seguridad que marca la IMO.

-Buques con propulsión mediante pilas de hidrogeno. Por el mismo motivo que el caso anterior.

-Barcos multipropósito híbridos diesel-eléctricos pero a velocidad variable. Porque la tecnología es muy reciente y solo ha sido desarrollada por dos empresas, SIEMENS y ABB, con lo que la falta de información imparcial con la que poder comparar la facilitada por ambas empresas es muy complicada.

## 6.2.1 PROPULSIÓN DIESEL MECÁNICA. PROPULSIÓN Y GENERACIÓN DE REFERENCIA.

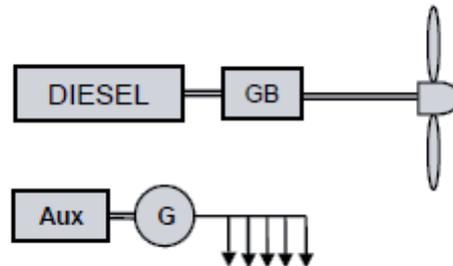


Figura 26. Esquema de propulsión y generación del remolcador tomado para la realización de este Trabajo Fin de Grado.[69]

Como se puede apreciar en la figura 26 la propulsión es independiente de la producción eléctrica, así es como se encuentra el remolcador tomado como referencia. Lo único que falta en la figura son las cantidades ya que en el caso de referencia hay dos motores principales cada uno impulsa dos Voith y tres generadores, como ya se ha explicado dos generadores y un generador de puerto. En el esquema de la figura superior cabe destacar que falta la multiplicadora que utilizan las bombas de los cañones FIFI y de las máquinas de remolque. Este esquema es un ejemplo para ver cómo va a cambiar de un sistema de generación y propulsión independiente a un sistema híbrido, ambos están combinados.

## 6.2.2 PROPULSIÓN HÍBRIDA. PROPULSIÓN Y GENERACIÓN DE ESTUDIO.

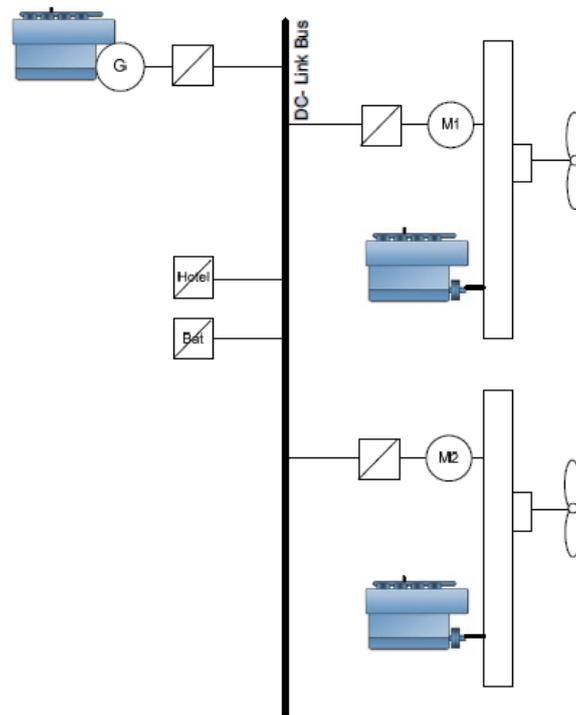


Figura 27. Esquema de la propulsión híbrida, mecánica y eléctrica; y de la generación.

Nótese que solo hay un generador, pero es solo un esquema y dependerá del estudio cuantos generadores haya.[70]

Este es el caso que se va a simular y comparar con el anterior, este es la idea del Trabajo Fin de Grado, viendo si se reducen las emisiones y los consumos, estos son los objetivos del Trabajo Fin de Grado. El esquema de la figura 27 se ve como los MM PP mueven los propulsores y además tienen la ayuda de unos motores eléctricos para realizar dicha tarea. En este caso si coinciden porque hay dos de cada igual que se hará en el estudio, pero en cambio en la zona de generación solo hay un generador. En el caso de estudio contaremos con más generadores dependiendo de lo que haga falta, además en el esquema tampoco aparece una desviación para el resto de los equipos de la sala de maquinas. Por último no se contempla la posibilidad de utilizar parte de la energía de los MM.PP para la generación eléctrica usando lo que se conoce como generador de cola o incluso aprovechando los motores eléctrico como motores.

### 6.3 NUEVOS EQUIPOS.

Se instalan dos MM.PP distintos a los originales, los 16V228MDF de GENERAL ELECTRIC son sustituidos por el modelo 6L20 de WÄRTSILÄ que a las mismas revoluciones, 100 r.p.m. dan una potencia de 1200kW. Para 900 r.p.m. dan 1100kW y cumplen al igual que los anteriores con la normativa TIER II de la IMO, no se poseen datos específicos de las emisiones como en los anteriores casos. Pero si se posee el dato del flujo de gases de escape a distintas revoluciones a 1000 r.p.m. es 2,38kg/kW-s, además se sabe el porcentaje de CO<sub>2</sub> que hay en los gases de escape 12% y el de NO<sub>x</sub> 0,3% [71].

Con lo que se puede hallar cuanto flujo másico hay de cada uno de los componentes, aplicando el porcentaje a 2,38kg/s y pasándolo a horas. De CO<sub>2</sub> hay 1028,16kg/h y de NO<sub>x</sub> 7,14kg/h. Repitiendo la misma operación a 900 r.p.m. hay un flujo de 2,12kg/s, por lo que las emisiones de CO<sub>2</sub> son 915,84kg/h y de NO<sub>x</sub> son 6,36kg/h. Para 600 r.p.m. el flujo es de 1,23kg/s con lo que las emisiones son de CO<sub>2</sub> 531,36kg/h y de 3,69NO<sub>x</sub> kg/h.[72]

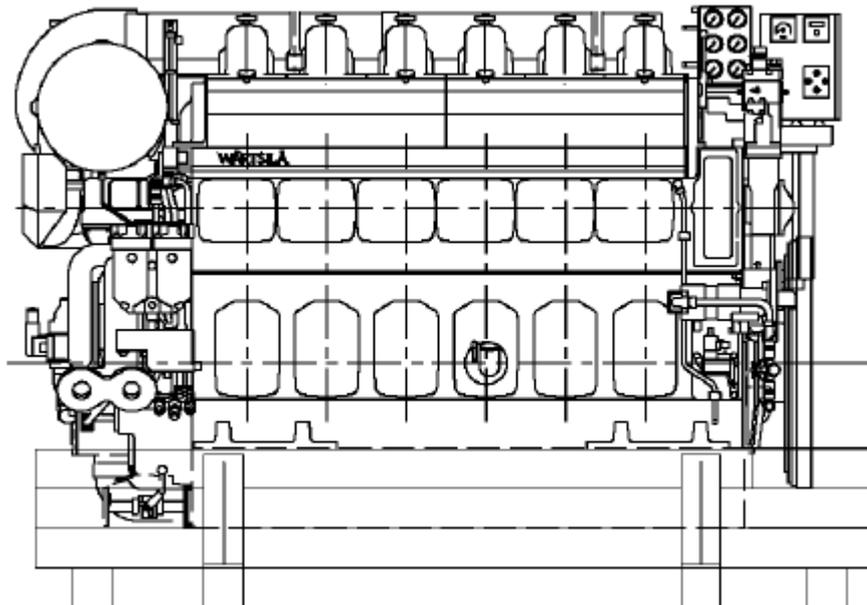


Figura 28. Esquema del nuevo motor de WÄRTSILÄ para ser usado como el MM.PP Diesel.[73]

Respecto a los consumos al 100% de la carga y 1000 r.p.m. tienen un consumo específico de 192g/kW-h y a 900 r.p.m. y el 75% de la carga tienen un consumo específico de 189g/kW-h. Tiene una cilindrada de 8,8l/cyl, tiene 6 cilindros en línea, una carrera de 280mm y un diámetro de 200mm y al igual que el motor de GENERAL ELECTRIC es de 4 tiempos.[74]

Se instalan dos generadores distintos a los originales con una potencia de 750kW a 1000r.p.m. son el modelo 6EY18ALW de la compañía YANMAR, son motores de cuatro tiempos con una carrera de 280mm y un diámetro de 180mm. El consumo específico de dichos motores es de 201,6g/kW-h.[75] A diferencia de lo que ocurre en los motores principales se desconocen las emisiones de gases, tampoco se sabe algún dato para poder calcularlas, solo se sabe que cumple con los requerimientos de la IMO, TIER II.

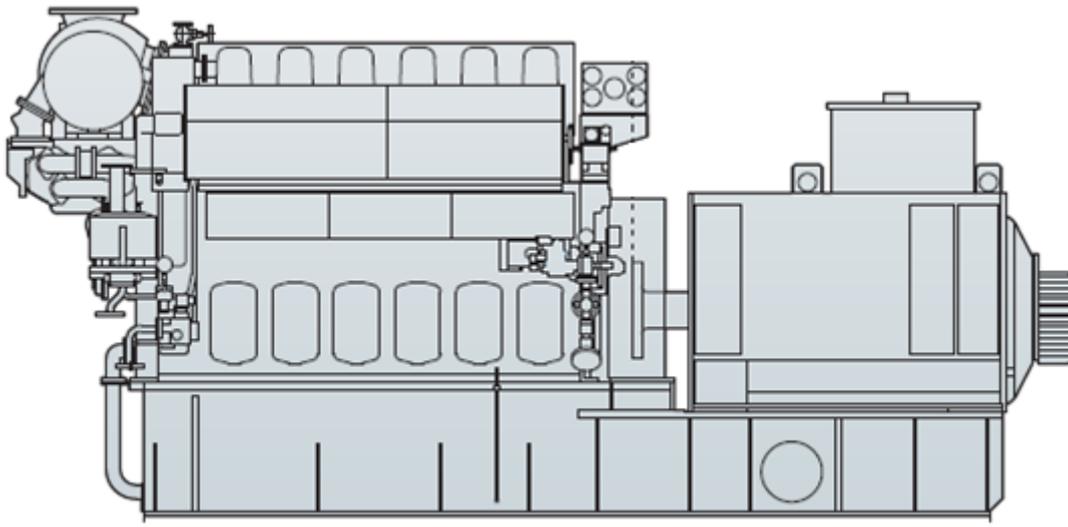


Figura 29. Esquema del nuevo tipo del generador instalado, modelo 6EY8ALW de la compañía YANMAR.[76]

Por otro lado están las baterías que son de la marca TROJAN modelo L16RE-2V, cada una tiene un voltaje de 2V y una capacidad de 1235Ah son de la tecnología de plomo ácido, además son 0,4C que quiere decir que cargan 0,4 veces la capacidad. Con dicha tecnología no es necesario un cargador ya que al igual que descargan la corriente al cuadro control, se

pueden cargar de enviándoles corriente continua con el voltaje adecuado. Dicha función se puede realizar desde el propio cuadro de control, donde llega la energía de los generadores y de ahí se distribuye a los equipos.[77] Como hacen falta 1690kW durante una hora para la maniobra y 676kW durante 20 minutos para la navegación, se decide instalarlas de la siguiente forma.

Lo primero es decidir a qué tensión se van a cargar y descargar, como los generadores producen a 400V [78] y es la tensión que hay en el cuadro se escoge esta tensión. Lo único que hay que hacer, lo hacen los convertidores es pasarla de corriente alterna, como se produce, a corriente continua, la que necesitan las baterías, en el caso de la carga. En el caso de la descarga los convertidores la pasarían a corriente alterna para poder usarla en los equipos. Se colocan en serie cada batería formando así un conjunto, cada conjunto está compuesto por 200 baterías, 2V de cada batería por 200 baterías igual a 400V la tensión elegida. Los conjuntos entre sí estarán en paralelo.

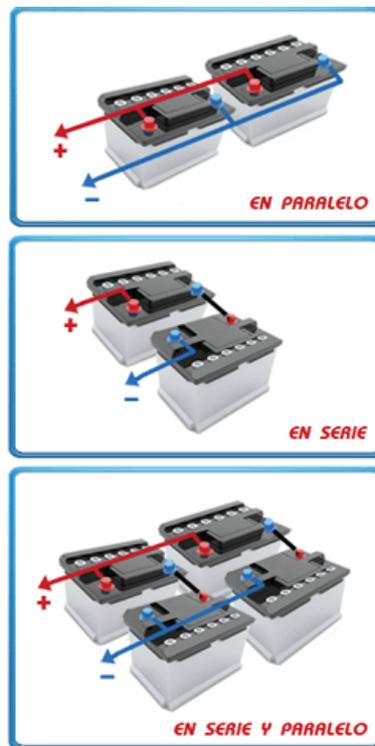


Figura 30. Esquema de cómo montar las baterías en paralelo, en serie y en serie paralelo.[79]

El siguiente paso es dictaminar cuantos conjuntos hacen falta y en cuanto tiempo se descargan y en cuanto tiempo se cargan. Se calcula la potencia que da cada conjunto  $POTENCIA(W)/TENSION(V)=CAPACIDAD(Ah)$  por lo que aplicando esta fórmula se tiene que cada conjunto tiene 494kW de potencia. En el caso máximo se necesitan 1690kW, se divide  $1690/494=3.4$  por lo que con cuatro conjuntos bastaría, pero para estar seguro al 100% se cogen 5 conjuntos con una potencia de 2470kW. Si descargan a 400V y tienen una capacidad de 1235Ah la potencia a la que descargan en una hora cada conjunto es de 494kW/h por lo que descargan los 2470kW en una hora. No es interesante que se descarguen en de forma completa por lo que solo se hará al 80%, ya que si lo hacen al 100% sus ciclos disminuirían.

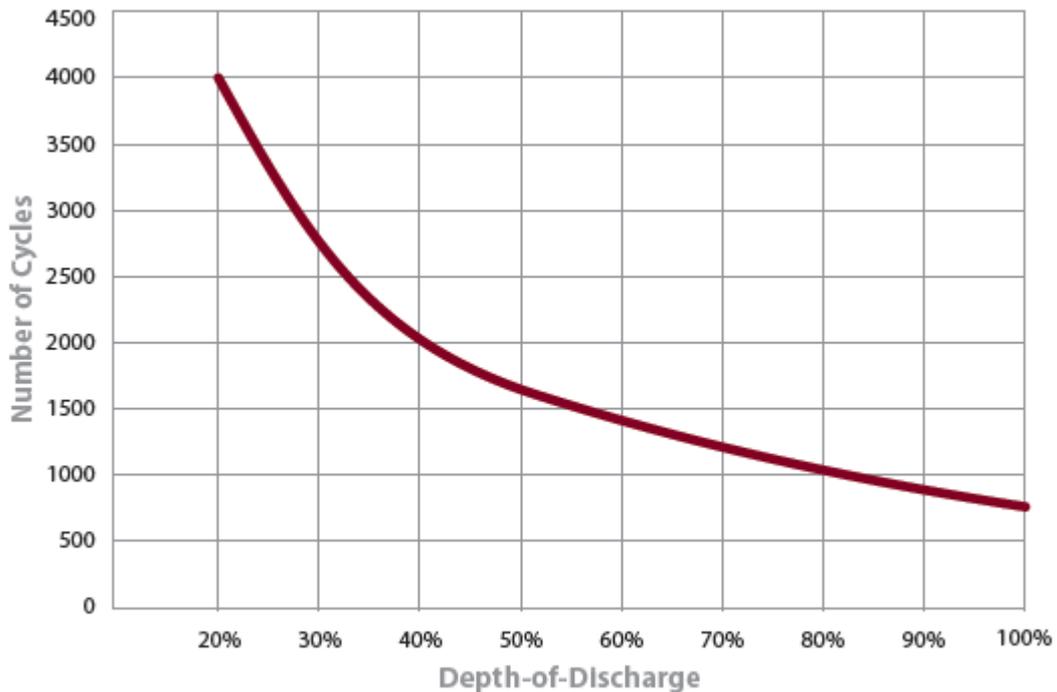


Figura 31. Grafica de la vida útil de la batería 16RE-2V, en el eje horizontal esta el porcentaje de descarga y en el eje vertical el numero de ciclos de carga y descarga.[80]

Para ello si el 100% es de 1235Ah el 80% es de 1192,5Ah, si se multiplica por la tensión, 400V, se tiene una potencia de 477kW en cada conjunto y en total 2385kW/h que siguen siendo más que la potencia requerida en una hora y 20 minutos de trabajo del remolcador,

2366kW/h. Teniendo en cuenta que cuando está amarrado al muelle carga las baterías. Con una descarga al 80% haría 1000 descargas en su vida útil y son tres maniobras de media al día, con lo que durarían unos 333 días, en el peor de los casos. La carga se haría durante el tiempo amarrado al muelle con el generador y con la corriente de tierra, las baterías son 0,4C lo que quiere decir que cargarían  $0,4 \times 1235h = 494A$  estos amperios se dividen por la capacidad  $1235/494 = 2,5$ . Así que las baterías tardarían en cargar 2,5h consumiendo  $494 \times 400 = 197600W$  en kW, 197,6.

Por último están los motores eléctricos que hacen falta a bordo, ya que ahora si son necesarios. Debido a la tremenda dificultad de encontrar catálogos de los motores, como si se ha podido encontrar de los motores de combustión. Y debido también a que sus regímenes de trabajo no son tan estrictos, pueden trabajar a diferentes revoluciones dando las mismas potencias, se opta por la opción de mencionarlos con las características que son necesarias en este trabajo.

Se instalan dos motores eléctricos de 811kW, a 1800 r.p.m. para mover las bombas de los cañones FIFI y dos motores de 165kW, también a 1800 r.p.m. para mover las bombas de hidráulica para la máquina de remolque. En estos dos casos las potencias son las que salen por el eje, la potencia que llega a las bombas por lo que los motores deberían de dar algo mas, ya que parte se elimina debido a las pérdidas. Aun que esta información es conocida, en las tablas los datos que se han puesto son estos ya que así es más sencilla la comprensión del texto. Por lo que estos motores son de más potencia que los aparecidos en las tablas para compensar las pérdidas.

Se añaden dos motores de imanes permanentes de 880kW para mover los Voith, uno para cada Voith para llegar a las potencias que había antes de la hibridación. Dicha potencia es la máxima que necesitan a 1000 r.p.m. pero como también pueden trabajar a otros regímenes sin problemas son capaces de dar a las mismas revoluciones los 450kW que necesitan para el caso de la maniobra. Los motores de imanes permanentes poseen la característica, entre otras, de poder controlar la velocidad y la potencia, haciendo así posible adecuarse a las revoluciones y las potencias que se necesitan en cada caso.

#### 6.4 ESTUDIO COMPARATIVO.

Lo primero de todo antes de empezar con el estudio en sí, es aclarar el tiempo que pasa el remolcador en cada condición de trabajo. Ya que si los tiempos en cada uno de los casos a comparar son distintos el estudio no estaría realizado de una forma correcta y los resultados estarían alterados. Por eso a continuación se puede ver, en la figura 32, se tienen las horas que pasara en remolcador en cada condición estos tiempos se mantendrán iguales en los dos estudios.

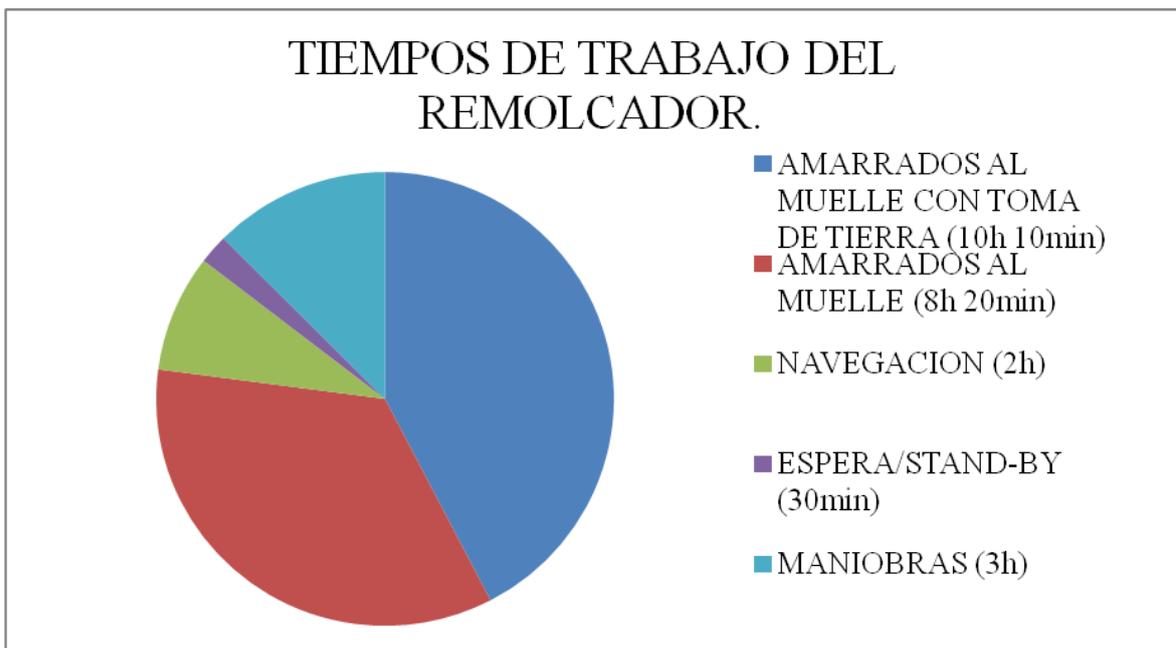


Figura 32. Horas que pasa el remolcador de referencia trabajando en las distintas condiciones en un día.[81]

Se va a comenzar el estudio comparativo por la condición más desfavorable de todas, en la que hay una necesidad mayor de energía, esta es la maniobra ya que aparte de estar navegando, también entran en juego la máquina de remolque, con las bombas hidráulicas; y en un caso extremo las bombas de los FIFI. Estas dos bombas, de los cañones FIFI, acopladas a cada motor necesitan una potencia de 811kW, por otro lado las bombas acopladas para la máquina de remolque necesitan 165kW, cada una. Como los motores principales se van a redimensionar, lo más probable es que sean más pequeños, no pueden

tener acopladas dichas bombas, por lo que serán operadas por motores eléctricos. Con respecto a las reductoras de los Voith se mantendrán, por eso los nuevos MM.PP tendrán que trabajar en las mismas revoluciones que los actuales.

#### 6.4.1 CONDICIÓN N°1: MANIOBRAS.

##### 6.4.1.1 DATOS DE LOS MANUALES DEL REMOLCADOR.

Durante las tres maniobras que realiza el remolcador de media en un día, 1 hora por maniobra 3 horas en total, este trabaja de la siguiente forma. Los MM.PP trabajan en un rango de revoluciones que van desde las 600 hasta las 1000 r.p.m. con unas cargas de trabajo del 25% al 100%, administrando unas potencias que van desde los 660kW a los 2640kW. El consumo específico en estos regímenes de trabajo es de 203,3g/Kw-h a 600 r.p.m. y 202g/kW-h a 1000 r.p.m. Además a 800 r.p.m. es de 197,9g/kW-h a 900 r.p.m. es de 195,5g/Kw-h.[82]

Respecto a las emisiones de gases se puede decir que a este régimen de trabajo se tiene un flujo másico de NO<sub>x</sub> de 18,04kg/h y un flujo másico de CO<sub>2</sub> de 1220,5kg/h para 1000 r.p.m. Para 900 r.p.m. estos datos son flujo másico de NO<sub>x</sub> de 11,52kg/h y un flujo másico de CO<sub>2</sub> de 944,9 kg/h, para 800 r.p.m. flujo másico de NO<sub>x</sub> de 12,62kg/h y un flujo másico de CO<sub>2</sub> de 912kg/h y por último para 600 r.p.m. son flujo másico de NO<sub>x</sub> de 9,05kg/h y un flujo másico de CO<sub>2</sub> de 604,8kg/h.[83]

Respecto a la generación eléctrica se hace con los generadores y en esta operación, la maniobra, solo trabaja uno de ellos el otro está en espera por si falla el primero. De los generadores solo se pose la información de la potencia de 230kW a 1500 r.p.m. y las emisiones de gases de escape que son un flujo másico de NO<sub>x</sub> de 1,853kg/h y un flujo másico de CO<sub>2</sub> de 179kg/h. El consumo específico de un generador es de 218,7g/kW-h. [84]

MANIOBRA	R.P.M	POTENCIA	CONSUMOS	EMISIONES
GENERADOR	1500	230kW	218,7g/kW-h	NO <sub>x</sub> 1,853kg/h CO <sub>2</sub> 179kg/h
MM.PP.(uno)	600	660kW	203,3g/Kw-h	NO <sub>x</sub> 9,05kg/h CO <sub>2</sub> 604,8kg/h
MM.PP.(uno)	800	1320kW	195,5g/Kw-h	NO <sub>x</sub> 12,62kg/h CO <sub>2</sub> 912kg/h
MM.PP.(uno)	900	1980kW	197,9g/kW-h	NO <sub>x</sub> 11,52kg/h CO <sub>2</sub> 944,9 kg/h
MM.PP.(uno)	1000	2640kW	202g/kW-h	NO <sub>x</sub> 18,04kg/h CO <sub>2</sub> 1220,5kg/h

Tabla 1. Resumen de los datos obtenidos de los manuales para la condición maniobra.  
(Estos datos han sido obtenidos de las mismas fuentes que ya aparecen en la bibliografía)

Se hace una media aritmética de los consumos específicos y de las potencias:  $(660+1320+19980+2640)/4=1650\text{kW}$  y  $(203,3+197,9+195,5+202)=199,675\text{g/kW-h}$ . Así se pueden pasar los datos del consumo específico (g/kW-h) a h/l para poder compararlos con los datos obtenidos en el remolcador. Para ello se necesita conocer la densidad del diesel marino que es  $0,89\text{g/cm}^3$ [85].  $199,675 \times 1650 = 329463,375\text{g/h}$  pasado a kg  $329.46\text{kg/h}$  y pasado a litros por hora dividiendo entre la densidad se tiene  $370,18\text{l/h}$  consume un motor principal de media durante la condición maniobra.

Se hace también la media aritmética de las emisiones de gases y se tiene que para una hora de maniobra hay un flujo másico de NO<sub>x</sub>  $12,8\text{kg/h}$  y hay un flujo másico de CO<sub>2</sub>  $920,55\text{kg/h}$ .

#### 6.4.1.2 DATOS OBTENIDOS DURANTE LAS PRÁCTICAS.

Tiempo del Generador (horas)	3	3	6	7	4	6	2	2	5	6
Tiempo MM.PP (horas)	4	2	6	6	3	6	3	2	3	3
Consumo de Diesel (litros)	2400	1600	5000	4000	2900	4000	2400	3600	4800	2400

Tabla 2. Consumo de diesel durante varias maniobras. (Estos datos han sido obtenidos del Libro de Máquinas los consumos y las horas del generador; y del Diario de Navegación las horas que duraron las maniobras por lo tanto las horas de los MM.PP)

Si se hace la media aritmética de la tabla número 2 hay un consumo de 871,05l/h, algunos consumos en la tabla no son proporcionales al tiempo porque depende del tipo de maniobra. Es decir si es necesaria más o menos potencia de empuje o más potencia de tiro. Las emisiones de los gases no se pueden medir durante la propia maniobra ya que el remolcador no posee medidores en la salida de los gases de escape, por lo que los valores dados por los manuales serán los que se tomen para la realización del estudio.

Respecto al consumo eléctrico se observa en el medidor del panel de control que hay un consumo de 150kW en la hora que dura la maniobra por lo que el consumo eléctrico es de 150kW/h durante las maniobras. En este consumo están todos los equipos del puente, habitación y de la sala de máquinas incluyendo la bomba auxiliar de la máquina de remolque. Que tiene las siguientes características: una potencia de 45,8kW suministrados por un motor eléctrico, un caudal de 449l/min, una presión de con un 50 bar y unas revoluciones de 2900 r.p.m.[86]

### 6.4.1.3 COMPARACIÓN.

Antes de empezar con la comparación en si misma cabe aclarar, que todos los equipos nuevos que se van a comentar dentro de los sucesivos apartados llamados Comparación están reflejados en el apartado 6.4 Nuevos Equipos. Se hace esta mención aquí porque como ya se ha visto en anteriores apartados hay datos que se repiten, por ejemplo los que aparecen en Características del Remolcador, Motores Principales y Generadores Eléctricos, se han vuelto a mencionar durante esta condición de maniobra y se volverá a hacer durante las siguientes. Esto se hace con el fin de tener los datos lo mas ordenados posibles y que sea posible la lectura de este Trabajo Fin de Grado.

Por ser la maniobra la condición más desfavorable, en la que mas equipos se encuentran en marcha, en la que más consumo tanto eléctrico como de combustible hay, se ha decidido empezar por ella. Lo primero que se ha de hacer es un balance de los consumidores de energía, ya sea mecánica o eléctrica, en la maniobra, hay que hacerlo en la condición actual y en la de la hibridación. En el balance de la hibridación se tendrán en cuenta, como ya se ha mencionado anteriormente que las bombas de hidráulica y de los FIFI estarán accionadas por equipos eléctricos y además habrá baterías que suministrarán energía.

<b>BALANCE DE ENERGÍA (kW)</b>	
<b>CONSUMIDORES DE ENERGÍA</b>	<b>PRODUCTORES DE ENERGÍA</b>
<b>ELÉCTRICA</b>	<b>ELÉCTRICA</b>
EQUIPOS MÁQUINAS/PUENTE/ HABILITACIÓN. 150	GENERADOR. 230
TOTAL. 150	TOTAL. 230
<b>MECÁNICA</b>	<b>MECÁNICA</b>
VOITH. 2640x2=5280	MM.PP. 2640x2=5280

Tabla 3. Balance energético antes de la hibridación para la condición maniobra. (Realizada al juntar los datos escritos en el texto en una tabla)

El remolcador durante la maniobra, en el peor de los casos, trabaja con la máquina de remolque y con los FIFI descargando agua, debido a un incendio aunque en caso de que esto ocurriera el barco remolcado sería soltado inmediatamente porque así lo establecen la normativa y el sentido común. Además también trabajarían los equipos para la propulsión. Para poder suministrar toda la energía que necesita tendría que accionar los MM.PP y el generador.

En principio se podría pensar que los motores eléctricos que mueven los Voith deberían de dar potencia hasta llegar a los 5280kW que había antes de la hibridación. Pero esto no es así no se necesita tanta potencia. Se debe principalmente a que las bombas de los FIFI y de la máquina de remolque ya no son operadas por los MM.PP. Se puede estimar por lo tanto que los Voith necesitan 5280kW de potencia menos la que consumen las bombas de los FIFI y las bombas de la máquina de remolque. El cálculo se hace restando la potencia de las ya mencionadas bombas a la potencia antes de la hibridación.

Las pérdidas harían la resta mayor, aunque la eficiencia de la reductora es de casi el 100%, concretamente del 98,5% dichas pérdidas se tienen en cuenta:[87] 811kW de las bombas del FIFI, salen del motor 823kW. 165kW de las bombas de la máquina de remolque, salen del motor 167kW. Por lo que los Voith consumen  $5280 - (823 \times 2) - (167 \times 2) = 3300$  kW de los cuales 2400kW son aportados por los MM.PP Diesel por lo que el resto lo darán los MM.PP Eléctricos, 900kW.

<b>BALANCE DE ENERGÍA (kW)</b>	
<u>CONSUMIDORES DE ENERGÍA</u>	<u>PRODUCTORES DE ENERGÍA</u>
<b>ELÉCTRICA</b>	<b>ELÉCTRICA</b>
EQUIPOS MÁQUINAS/PUENTE/ HABILITACIÓN. 105	GENERADORES. 750x2=1500
MOTORES BOMBAS FIFI. 811x2=1622	BATERÍAS 494x5=2470
MOTORES BOMBAS M.R. 165x2=330	
MOTORES ELÉCTRICOS. 450x2=900	
TOTAL. 2962	TOTAL. 3970
<b>MECÁNICA</b>	<b>MECÁNICA</b>
VOITH. 1200x2=2400	MOTORES DIESEL. 1200x2=2400

Tabla 4. Balance energético después de la hibridación para la condición maniobra. Cabe aclarar que no se haría uso de toda la potencia acumulada en las baterías, aunque se refleje en la tabla. (Realizada al juntar los datos escritos en el texto en una tabla)

Durante esta condición de maniobra en las peores circunstancias el remolcador trabaja durante una hora con los MM.PP Diesel y los dos MM.PP Eléctricos para darle propulsión al buque. En la parte eléctrica están trabajando los dos generadores que dan energía a los MM.PP Eléctricos, a los motores de las bombas de los FIFI y de las bombas de la máquina de remolque además del resto de equipos de puente, máquinas y habilitación. Las baterías dan ese extra de energía que hace falta para poder tener suficiente potencia eléctrica.

El consumo de combustible es de 192g/kW-h y 189g/kW-h[88] para el motor principal por lo que se hace una media y se pasa a l/h para poder compararlo con el hallado anteriormente.  $190,5\text{g/kW-h} \times 2400\text{kW} = 457200\text{g/h}$  pasado a kg 457,2kg/h y pasado a l/h dividiendo por la densidad quedan 513,7l/h. El consumo del generador es de 201,6g/kW-h [89] no hay que hacer media porque siempre trabajan al mismo régimen, se hace la misma operación y se tiene 339,77l/h los dos generadores. Si se suman las dos cantidades se tiene un consumo de 853,47l/h, frente a los 871,05l/h que había antes de la hibridación, una reducción del 2% para este caso.

Para comparar la reducción o no de las emisiones se tienen los datos obtenidos en el apartado 6.3 Nuevo Equipos, se hace una media de los mismos y se tiene que para un motor principal hay un flujo másico de NO<sub>x</sub> hay 5,73kg/h y de CO<sub>2</sub> hay 825,12kg/h. Solo se puede hacer una comparación del equipo del que se posee los datos, pero como los dos generadores cumplen la misma regla TIER II, se puede suponer que son las mismas. Los datos del flujo másico del principal son NO<sub>x</sub> 12,8kg/h y hay un flujo másico de CO<sub>2</sub> 920,55kg/h. la disminución de las emisiones es de un 55% para los NO<sub>x</sub> y de un 11% para el CO<sub>2</sub>.

#### 6.4.2 CONDICIÓN N°2: NAVEGACIÓN.

##### 6.4.2.1 DATOS DE LOS MANUALES DEL REMOLCADOR.

En esta operación el remolcador trabaja con las siguientes características los dos motores principales a 900 r.p.m. dando una potencia de 1980kw, con el 75% de la carga y con un consumo específico de 195,5g/kW-h.[90] Respecto a las emisiones de gases se puede decir que a este régimen de trabajo se tiene un flujo másico de NO<sub>x</sub> de 11,52kg/h y un flujo másico de CO<sub>2</sub> de 944,9kg/h.[91] Estas condiciones se dan durante las dos horas que pasa el remolcador navegando, 40 minutos por maniobra 20 para ir a la zona de maniobra y otros 20 para volver a la base.

Respecto a la generación eléctrica se hace con los generadores y en esta operación, la navegación, solo trabaja uno de ellos el otro está en espera por si falla el primero. Por lo tanto los datos vuelven a ser los mismos que en la condición de trabajo maniobra. Una potencia de 230kW a 1000 r.p.m. y las emisiones de gases de escape con un flujo másico de NO<sub>x</sub> de 1,853kg/h y un flujo másico de CO<sub>2</sub> de 179kg/h. Además de un consumo específico de 218,7g/kW-h.[92]

NAVEGACIÓN	R.P.M	POTENCIA	CONSUMOS	EMISIONES
GENERADOR	1500	230kW	218,7g/kW-h	NO <sub>x</sub> 1,853kg/h CO <sub>2</sub> 179kg/h
MM.PP.(uno)	900	1980kW	197,9g/kW-h	NO <sub>x</sub> 11,52kg/h CO <sub>2</sub> 944,9 kg/h

Tabla 5. Resumen de los datos obtenidos de los manuales para la condición navegación. (Estos datos han sido obtenidos de las mismas fuentes que ya aparecen en la bibliografía)

En este caso no hace falta hacer ninguna media, como se hizo anteriormente en el caso de la maniobra, ya que solo hay una condición posible de trabajo para los MM.PP y para el generador. Se pasa de g/kW-h a h/l como se hizo en el caso anterior  $197,9 \times 1980 = 391842 \text{g/h}$  y en kg  $391,842 \text{g/h}$  y utilizando la densidad de  $0.89 \text{g/cm}^3$  se tiene que el consumo es  $434,27 \text{l/h}$  para un motor

#### 6.4.2.2 DATOS OBTENIDOS DURANTE LAS PRÁCTICAS.

Tiempo del Generador (horas)	14	24	24	22
Tiempo MM.PP (horas)	14	24	24	22
Consumo de Diesel (litros)	14500	23100	22500	22300

Tabla 6. Consumo de diesel durante varios días de navegación. (Estos datos fueron obtenidos del Libro de Máquinas los consumos y las horas del generador; y del Diario de Navegación las horas que duro la navegación por lo tanto las horas de los MM.PP)

Si se hace una media aritmética de la Tabla 6, se puede concluir que los consumos de diesel son  $980,95 \text{h}$ . Los consumos varían en la tabla dependiendo de cómo este la mar en ese día, dependerá si la mar empuja por la popa o en cambio hay que hacerle frente por la proa. Respecto a las emisiones no hay forma de medirlas porque lo que se toman las

ideales como referencia. Respecto al consumo de energía eléctrica, que está siendo utilizada por los equipos del puente, la habilitación y los equipos de máquinas, bombas de agua, de aceite, controladores, sensores etc. Se observa en el medidor del panel del generador en marcha que se tiene un consumo de 105kW que no varían en exceso durante lo que dura la navegación, por lo que el consumo eléctrico es de 105kW/h.

#### 6.4.2.3 COMPARACIÓN.

Como ya se hiciera en la condición de maniobra se tiene que hacer un balance de energía antes y después de la hibridación.

<b>BALANCE DE ENERGÍA (kW)</b>	
<b>CONSUMIDORES DE ENERGÍA</b>	<b>PRODUCTORES DE ENERGÍA</b>
<b>ELÉCTRICA</b>	<b>ELÉCTRICA</b>
EQUIPOS MÁQUINAS/PUENTE/ HABILITACIÓN. 105	GENERADOR. 230
TOTAL. 105	TOTAL. 230
<b>MECÁNICA</b>	<b>MECÁNICA</b>
VOITH. 1980x2=3960	MM.PP. 1980x2=3960

Tabla 7. Balance energético antes de la hibridación para la condición navegación.  
(Realizada al juntar los datos escritos en el texto en una tabla)

En el caso de la navegación el remolcador trabaja con los dos principales a una carga del 75% y con una potencia de 3980kW y el generador produciendo 230kW hora de los cuales 105 son consumidos. La condición de maniobra no entraña nada en especial y como ya se ha dicho al empezar la misma tiene una duración de 20 minutos cada vez que se sale de la base y cada vez que se vuelve. Lo que supone un tiempo total al día de dos horas, cuarenta minutos por maniobra.

<b>BALANCE DE ENERGÍA (kW)</b>	
<b>CONSUMIDORES DE ENERGÍA</b>	<b>PRODUCTORES DE ENERGÍA</b>
<b>ELÉCTRICA</b>	<b>ELÉCTRICA</b>
EQUIPOS MÁQUINAS/PUENTE/ HABILITACIÓN. 105	GENERADORES. 750x2=1500
MOTORES ELÉCTRICOS. 880x2=1760	BATERÍAS. 494x5=2470
TOTAL. 1865	TOTAL. 3970
<b>MECÁNICA</b>	<b>MECÁNICA</b>
VOITH. 1100x2=2200	MOTORES DIESEL. 1100x2=2200

Tabla 8. Balance energético después de la hibridación para la condición navegación. Cabe aclarar que no se haría uso de toda la potencia acumulada en las baterías, aunque se refleje en la tabla. (Realizada al juntar los datos escritos en el texto en una tabla)

Después de la hibridación en la condición navegación el remolcador utilizará sus dos MM.PP Diesel a 900r.p.m. dando una potencia de 1100kW y consumiendo 192g/kW-h.[93] Utilizara también sus dos generadores para proveer de energía eléctrica estos trabajaran a 1000 r.p.m. dando cada uno 750kW y con un consumo de 201,6g/kW-h.[94] La energía eléctrica será consumida por los MM.PP Eléctricos para poder navegar en las mismas condiciones que antes y por los equipos de máquinas, puente y habilitación. Al igual que en el caso anterior las baterías darán ese extra para completar la demanda eléctrica.

Para poder comparar los consumos se repite la misma operación que en el paso anterior, y que se continuará haciendo en los siguientes pasos. 192g/kW-h se pasa a l/h  $189 \times 2200 = 415800 \text{g/h}$  se pasa a kg/h 415,8kg/h y se divide entre la densidad y ya se tiene en l/h. 467,6l/h. Los generadores por trabajar en el mismo régimen consumen lo mismo que antes que son 339,77l/h se suman estas dos cantidades y se tiene el consumo para una hora del remolcador hibrido que es 806,96l/h. Con lo cual respecto al consumo de 980,95l/h se tiene un ahorro del 17,4% para el caso de la navegación.

Para comparar la reducción o no de las emisiones se toman los flujos máscios a 900r.p.m. que son a las que trabajan los motores principales, con unos datos que son NO<sub>x</sub> 11,52kg/h

CO<sub>2</sub> 944,9 kg/h, para un motor. Para el nuevo motor principal se tiene un flujo másico de NO<sub>x</sub> hay 6,36kg/h y de CO<sub>2</sub> hay 915,84kg/h. comparando ambos datos se tiene una reducción del 45% para los NO<sub>x</sub> y una reducción del CO<sub>2</sub> del 4%.

#### 6.4.3 CONDICIÓN N°3: ESPERA/STAND-BY.

##### 6.4.3.1 DATOS DE LOS MANUALES DEL REMOLCADOR.

En este caso el remolcador utiliza sus dos MM.PP a 600 r.p.m. dando una potencia de 660kW con una carga del 25% y un consumo específico de 203,3g/Kw-h.[95] El generador esta en las condiciones de siempre 1500 r.p.m. dando una potencia de 230kW, con un consumo específico de 218,7g/kW-h.[96] Respecto a las emisiones un motor principal tiene un flujo másico de NO<sub>x</sub> de 9,05kg/h y un flujo másico de CO<sub>2</sub> de 604,8kg/h.[97] El generador tiene un flujo másico de NO<sub>x</sub> de 1,853kg/h y un flujo másico de CO<sub>2</sub> de 179kg/h.[98] El remolcador pasa 30 minutos al día en esta condición, 10 minutos por cada maniobra. Esperando a que el barco, a ser maniobrado llegue, en caso de una maniobra de entrada o a que esté listo, si es una maniobra de salida.

<b>ESPERA/STAND-BY</b>	<b>R.P.M</b>	<b>POTENCIA</b>	<b>CONSUMOS</b>	<b>EMISIONES</b>
GENERADOR	1500	230kW	218,7g/kW-h	NO <sub>x</sub> 1,853kg/h CO <sub>2</sub> 179kg/h
MM.PP.(uno)	600	660kW	203,3g/Kw-h	NO <sub>x</sub> 9,05kg/h CO <sub>2</sub> 604,8kg/h

Tabla 9. Resumen de los datos obtenidos de los manuales para la condición espera/stand-by. (Estos datos han sido obtenidos de las mismas fuentes que ya aparecen en la bibliografía)

Al igual que en la condición navegación no hace falta sacar una media ya que tanto el generador como los MM.PP trabajan durante los 10 minutos que dura esta maniobra en un

régimen constante. Lo único que hay que hacer es pasarlos a unos datos apropiados para poder compararlos. Se pasa el consumo específico de los MM.PP a l/h  $203,3 \times 660 = 134178 \text{g/h}$  y se pasa a kg/h dividiendo entre 1000  $134,178 \text{kg/h}$  se divide entre la densidad y ya está en l/h  $150,76 \text{l/h}$ . Para dos motores basta con multiplicar por dos esta última cifra por lo que  $301,52 \text{l/h}$  es el consumo de los MM.PP.

#### 6.4.3.2 DATOS OBTENIDOS DURANTE LAS PRÁCTICAS.

No se pose una tabla como la que puede haber en los otros apartados Datos obtenidos durante las prácticas. De las dos primeras condiciones se tienen los consumos de los MM.PP y del generador en marcha, porque se habían hecho durante las propias condiciones de trabajo. En este caso de la espera/stand-by no se pudo recoger dichos datos ya que por un lado no estaban en el Diario de Navegación ni el Libro de Maquinas, por otro lado el tiempo que dura esta condición es tan pequeño que hace prácticamente imposible una toma de datos correcta. Solo se dispone del consumo eléctrico ya que este se puede observar y es de  $100 \text{kW}$  durante estos diez minutos.

Para calcular el consumo del generador en marcha y así poder sumar el consumo al de los principales se usa el consumo específico  $218,7 \text{g/kW-h}$ , aplicando la fórmula ya conocida se tiene  $56,51 \text{l/h}$ . Por lo que sumando este consumo del generador al de los principales,  $301,52 \text{l/h}$ , se tiene el consumo total para la condición espera/stand-by  $358,03 \text{l/h}$ . Respecto a las emisiones se toman las dadas en los certificados de los motores, ya que son las únicas de las que se dispone, no se pueden medir en el caso real.

#### 6.4.3.3 COMPARACIÓN.

Como ya se hiciera en las anteriores condiciones se hace el balance de energía.

<b>BALANCE DE ENERGÍA (kW)</b>	
<b>CONSUMIDORES DE ENERGÍA</b>	<b>PRODUCTORES DE ENERGÍA</b>
<b>ELÉCTRICA</b>	<b>ELÉCTRICA</b>
EQUIPOS MÁQUINAS/PUENTE/ HABILITACIÓN. 100	GENERADOR. 230
TOTAL. 100	TOTAL. 230
<b>MECÁNICA</b>	<b>MECÁNICA</b>
VOITH. 660x2=1220	MM.PP. 660x2=1220

Tabla 10. Balance energético antes de la hibridación para la condición espera/stand-by.  
(Realizada al juntar los datos escritos en el texto en una tabla)

En este caso de la espera que tan solo dura 10 minutos por cada maniobra, el remolcador está trabajando con los motores a un 25% de su carga y 600 r.p.m., dando una potencia de ambos motores de 1220kW. El generador que está en marcha, igual que en los casos anteriores sigue trabajando a 1500 r.p.m. y dando 230kW, el consumo eléctrico es de 100kW.

<b>BALANCE DE ENERGÍA (kW)</b>	
<b>CONSUMIDORES DE ENERGÍA</b>	<b>PRODUCTORES DE ENERGÍA</b>
<b>ELÉCTRICA</b>	<b>ELÉCTRICA</b>
EQUIPOS MÁQUINAS/PUENTE/ HABILITACIÓN. 100	GENERADORES.750x2=1500
MOTORES ELÉCTRICOS. 660x2=1220	
TOTAL. 1320	TOTAL. 1500
<b>MECÁNICA</b>	<b>MECÁNICA</b>
-	-

Tabla 11. Balance energético después de la hibridación para la condición espera/stand-by.  
(Realizada al juntar los datos escritos en el texto en una tabla)

En esta condición el remolcador genera energía eléctrica que le sirve para los equipos de abordaje máquinas, puente y habilitación; y además para la propulsión a diferencia de los

casos anteriores. Como la potencia que requieren los Voith es tan pequeña no es necesario tener en marcha los MM.PP Diesel basta con lo que los MM.PP Eléctricos dan para mover los Voith, con la potencia necesaria. De esta forma se contribuye al ahorro energético ya que solo hay dos motores de combustión funcionando, en vez del caso anterior en el que había tres, los MM.PP y el generador.

Para ver si este ahorro es cierto se comprueban los consumos de diesel en los dos generadores  $201,6\text{g/kW-h}$  lo se pasa a l/h primero se multiplica el consumo específico por los kW.  $201,6 \times 1500 = 302400\text{g/h}$  se divide entre 1000  $302,400\text{kg/h}$  y se divide entre la densidad del diesel marino y se tiene un consumo de  $339,771\text{h}$ . se compara este resultado con el obtenido anteriormente, el de la situación antes de la hibridación, de  $358,031\text{h}$  por lo que el ahorro de combustible es de un 5%.

Respecto a las emisiones de gases de escape ya se sabe que los generadores cumplen con la normativa TIER II al igual que los principales, cuyo flujo másico, para un motor, es de  $\text{NO}_x$   $9,05\text{kg/h}$   $\text{CO}_2$   $604,8\text{kg/h}$ . Para 600 r.p.m. el flujo másico de los nuevos motores, para uno también es de  $\text{NO}_x$  hay  $3,69\text{kg/h}$  y  $\text{CO}_2$  hay  $531,36\text{kg/h}$ . Comparando ambos datos se tiene una disminución de las emisiones de  $\text{NO}_x$  del 60% y de  $\text{CO}_2$  del 13%.

#### 6.4.4 CONDICIÓN N°4: AMARRADO AL MUELLE.

##### 6.4.4.1 DATOS DE LOS MANUALES DEL REMOLCADOR.

En esta condición los MM.PP están parados ya que no hay movimiento está amarrado al muelle funcionando con el generador de puerto que tiene una potencia de  $230\text{kW}$  a  $1500$  r.p.m. No se poseen la curva característica de consumos por lo que no se puede conocer el consumo ideal del generador. El generador tiene un flujo másico de  $\text{NO}_x$  de  $1,853\text{kg/h}$  y un flujo másico de  $\text{CO}_2$  de  $179\text{kg/h}$ . [99]

AMARRADO AL MUELLE	R.P.M	POTENCIA	CONSUMOS	EMISIONES
GENERADOR	1500	230kW	218,7g/kW-h	NO <sub>x</sub> 1,853kg/h CO <sub>2</sub> 179kg/h

Tabla 12. Resumen de los datos obtenidos de los manuales para la condición amarrado al muelle. (Estos datos han sido obtenidos de las mismas fuentes que ya aparecen en la bibliografía)

#### 6.4.4.2 DATOS OBTENIDOS DURANTE LAS PRÁCTICAS.

Tiempo del Generador de Puerto (horas)	24	24	24	24	24	24	24	24
Consumo de Diesel (litros)	1050	1400	1400	1050	1050	1050	1050	1050

Tabla 13. Consumo de diesel durante varios días usando el generador de puerto. (Estos datos fueron obtenidos del Libro de Máquinas los consumos y las horas del generador)

Si se hace una media aritmética de la tabla 13, se tiene el consumo de diesel del generador de puerto que es de 47,911/h, los consumos de la tabla varían porque depende de cuantos calentadores haya conectados. Los calentadores se utilizan para que el agua de refrigeración y el aceite de lubricación de los MM.PP no se quede a temperatura ambiente, así cuando se vuelvan a poner en marcha no haya un choque térmico. Dependiendo de la temperatura ambiente que se tenga en cada momento los calentadores, dos por cada motor, deberán estar más o menos tiempo en funcionamiento. El consumo eléctrico durante estas horas es casi siempre constante solo usado por los equipos en funcionamiento en el puente, la habilitación y los ya comentados de la sala de máquinas. Este consumo es de 30kW por lo que se puede concluir con lo ya mencionado que hay un consumo de 30kW/h, durante las 8 horas y 20 minutos que pasa en esta condición de trabajo.

#### 6.4.4.3 COMPARACIÓN.

Lo primero como en los casos anteriores es hacer un balance de energía antes y después de la hibridación.

<b>BALANCE DE ENERGÍA (kW)</b>	
<u>CONSUMIDORES DE ENERGÍA</u>	<u>PRODUCTORES DE ENERGÍA</u>
<b>ELÉCTRICA</b>	<b>ELÉCTRICA</b>
EQUIPOS MÁQUINAS/PUENTE/ HABILITACIÓN. 30	GENERADOR. 93
TOTAL. 30	TOTAL. 93
<b>MECÁNICA</b>	<b>MECÁNICA</b>
-	-

Tabla 14. Balance energético antes de la hibridación para la condición amarrado al muelle.  
(Realizada al juntar los datos escritos en el texto en una tabla)

<b>BALANCE DE ENERGÍA (kW)</b>	
<u>CONSUMIDORES DE ENERGÍA</u>	<u>PRODUCTORES DE ENERGÍA</u>
<b>ELÉCTRICA</b>	<b>ELÉCTRICA</b>
EQUIPOS MÁQUINAS/PUENTE/ HABILITACIÓN. 30	GENERADOR. 230
CARGAR BATERÍAS. 197,6	
TOTAL. 227,6	TOTAL. 230
<b>MECÁNICA</b>	<b>MECÁNICA</b>
-	-

Tabla 15. Balance energético después de la hibridación para la condición amarrado al muelle. Las baterías solo se estarían cargando durante 5 horas. (Realizada al juntar los datos escritos en el texto en una tabla)

En esta condición que dura 8 horas y 20 minutos solo trabaja el generador de puerto que consume 47,911/h, esto es antes de la hibridación ahora se comparará con el consumo después de la hibridación. En este caso trabaja un generador de los que se utilizaban antes para la producción eléctrica, que se ha conservado para usar cuando el remolcador este en puerto. De estos generadores se tiene el consumo específico 218,7g/kW-h y se pasa a l/h para poder compararlo con la media de la tabla 13, usando la operación ya mencionada anteriormente; y es 56,511/h. Con lo que el aumento del consumo en esta operación es del 14,6%. Respecto a las emisiones no se pueden comparar ya que no se tienen los datos del flujo másico del generador de puerto ni ningún otro dato para poder hallarlo, solo se sabe que aumentarían ya que también aumento el consumo y es un generador más grande el del caso de la hibridación.

#### 6.4.5 CONDICIÓN N°5: AMARRADO AL MUELLE, PERO CON TOMA DE TIERRA.

A diferencia de las condiciones de trabajo anteriores que siempre había algún motor en funcionamiento en este caso no los hay, ya que además de no haber movimiento la corriente se obtiene de tierra. Con lo que no tiene mucho sentido que se divida esta condición como las anteriores ya que no se tienen datos de los manuales ni tomados en las prácticas a excepción del consumo eléctrico, como viene explicado en el siguiente párrafo.

En esta condición solo hay consumo eléctrico de la habilitación, del puente los equipos que estén en marcha y de la sala de maquinas los equipos básicos como calentadores. El consumo eléctrico es de unos 30kW y no varía demasiado de una hora a otra, por lo que se puede considerar que el remolcador esta 10 horas y 10 minutos al día consumiendo 30kW/h proporcionados por la corriente de tierra.

Después de la hibridación el remolcador se encontraría en las mismas condiciones solo con la diferencia del consumo eléctrico que sería mayor, debido a que hay que recargar las baterías. Durante algunas horas hay que cargar las baterías, concretamente durante 2 horas y 30 minutos por lo el consumo eléctrico subiría hasta los 227,6kW/h durante esas dos

horas que serían dados por la toma de tierra. El resto de las horas, 7 horas y 40 minutos seguiría con un consumo de 30kW.

El coste de un kW/h dentro del puerto de Santurce es de 0,19euros/kW-h[100] por lo que los costes de esta operación quedarían de la siguiente forma. Antes de la hibridación hay 10 horas y 10 minutos al día de trabajo consumiendo 30kW/h si se multiplican queda un coste al día de 57,95 euros. Después de la hibridación hay dos consumos distintos durante 2 horas y 30 minutos, cuando se cargan las baterías, es de 227,6kW/h y durante 7 horas y 40 minutos hay un consumo eléctrico de 30kW/h. Si se multiplican por el precio del kW/h hay unos costes de 108,11 euros para las dos horas y media y 43,7 euros para el resto de las horas. Por lo que el coste total para después de la hibridación es de 151,81 euros.



## 7. CONCLUSIONES.

Las conclusiones se harán desde el punto de vista de los objetivos, el objetivo principal o meta era hacer una comparación y como demuestra el apartado que precede a este, se ha cumplido. El siguiente objetivo era la reducción de emisiones de gases y la reducción de los consumos, para cada una de las circunstancias comentadas en los objetivos. Así que se va a comprobar si se han cumplido dichos objetivos de forma individual y de forma global.

Hay un caso especial como es el de amarrado al muelle pero con toma de tierra que no tiene comparación respecto a los consumos ni a las emisiones, como ya se ha comentado en el apartado objetivos. Por eso se decide observar desde un punto de vista económico, ya que se conocen los consumos eléctricos y la tarifa que aplica el puerto de Santurce. En este caso el aumento del gasto es del 61,8%, 93,86 euros más al día en esta condición.

Reducción del consumo:

- En el caso de la maniobra se tiene un ahorro del 2%, gracias al uso de las baterías.
- En el caso de la navegación se tiene un ahorro del 17,4%, gracias al uso de las baterías.
- En el caso de la espera/stand-by se tiene un ahorro del 5%, gracias a que solo hay dos motores trabajando en vez de los tres que había antes de la hibridación. Estos dos motores, que son los generadores son más eficientes que los MM.PP que había antes de la hibridación.
- En el caso de amarrado al muelle se aumenta el consumo en un 14,6%, debido a que hay que cargar las baterías.

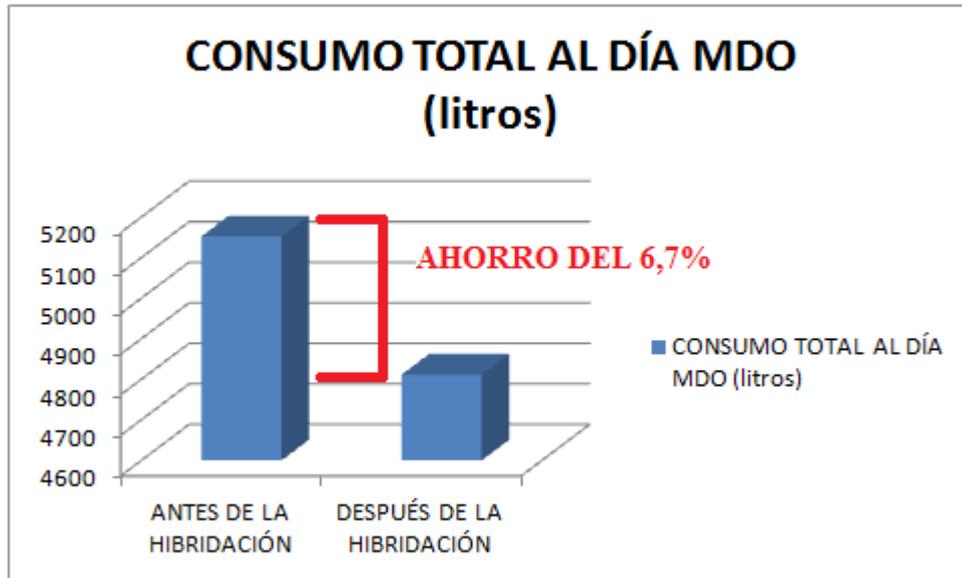


Figura 33. Grafica del consumo de combustible al día en litros, con el detalle del ahorro.[101]

Respecto a las emisiones de gases de escape:

-Para la condición de la maniobra la disminución de las emisiones es de un 55% para los  $\text{NO}_x$  y de un 11% para el  $\text{CO}_2$ .

-Para la condición navegación se tiene una reducción del 45% para los  $\text{NO}_x$  y una reducción del  $\text{CO}_2$  del 4%.

-Para la condición de espera/stand-by se tiene una disminución de las emisiones de  $\text{NO}_x$  del 60% y de  $\text{CO}_2$  del 13%.

-Para la condición de amarrado al muelle no se pueden comparar los datos, ya que faltan los datos del generador de puerto, no se sabe como son las emisiones de dicho equipo.

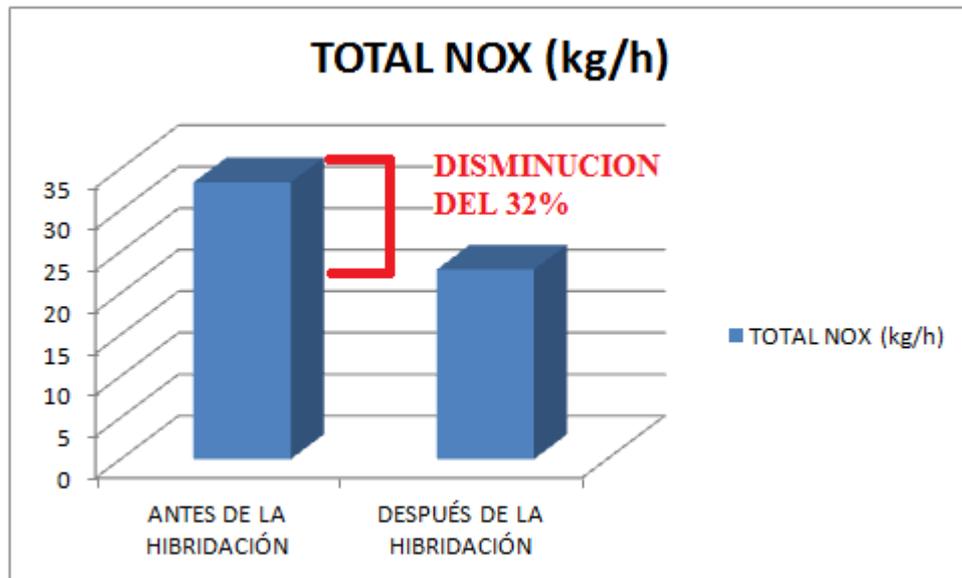


Figura 34. Grafica de las emisiones de NOx durante un día de trabajo, solo las de los MM.PP.[102]

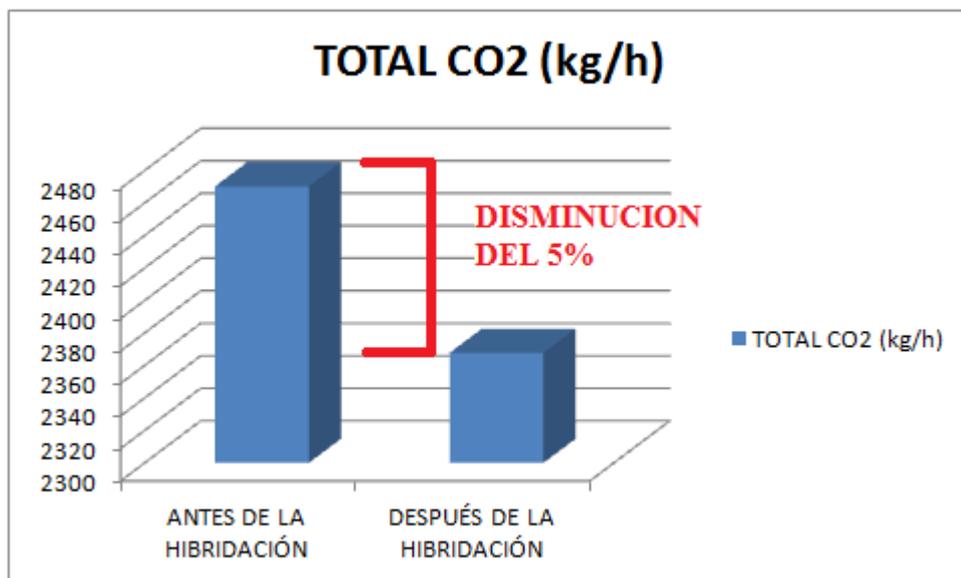


Figura 35. Grafica de las emisiones de CO<sub>2</sub> durante un día de trabajo, solo las de los MM.PP.[103]



## 8. BIBLIOGRAFÍA.

1. WEB ADMIN. 2009. *Solar System Project*.  
<http://www.solar.lynnautorepair.com/content/auriga-leader> [Consulta 26 de Febrero de 2015]
2. NYK GROUP. 2009. *News Releases*.  
[http://www.nyk.com/english/release/31/NE\\_090908.html](http://www.nyk.com/english/release/31/NE_090908.html) [Consulta 26 de Febrero de 2015]
3. Wallenius Wilhelmsen. 2010. *GREEN FLAGSHIP*.  
<http://www.2wglobal.com/globalassets/environment/orcelle-green-flagship.pdf>  
[Consulta 26 de Febrero de 2015]
4. Wallenius Wilhelmsen. 2010. *GREEN FLAGSHIP*.  
<http://www.2wglobal.com/globalassets/environment/orcelle-green-flagship.pdf>  
[Consulta 26 de Febrero de 2015]
5. Wallenius Wilhelmsen. 2010. *GREEN FLAGSHIP*.  
<http://www.2wglobal.com/globalassets/environment/orcelle-green-flagship.pdf>  
[Consulta 26 de Febrero de 2015]
6. WEB ADMIN. 2008. *Clase María de Maeztu*.  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Clase\\_Mar%C3%ADa\\_de\\_Maeztu](http://es.wikipedia.org/wiki/Clase_Mar%C3%ADa_de_Maeztu) [Consulta 2 de Marzo de 2015]
7. Autor Desconocido. 2012. *Sistema Propulsor y Auxiliar del Buque de Salvamento María Zambrano*. Trabajo de Presentación de Practicas.
8. WEB ADMIN. 2014. *Buques de Salvamento Marítimo. La Clase María de Maeztu*.  
<https://vadebarcos.files.wordpress.com/2014/04/gen-arrang.png> [Consulta 2 de Marzo de 2015]
9. Autor Desconocido. 2012. *Sistema Propulsor y Auxiliar del Buque de Salvamento María Zambrano*. Trabajo de Presentación de Practicas.

10. SIEMENS. 2008. *Reference Lists SISHIP Drive Lv*. Página 33.
11. SIEMENS. 2008. *Reference Lists SISHIP Drive Lv*. Página 33.
12. SIEMENS. 2008. *Reference Lists SISHIP Drive Lv*. Página 46.
13. SIEMENS. 2008. *Reference Lists SISHIP Drive Lv*. Página 46.
14. WEB ADMIN. 2008. *Distorsión Armónica*.  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Distorsi%C3%B3n\\_arm%C3%B3nica](http://es.wikipedia.org/wiki/Distorsi%C3%B3n_arm%C3%B3nica) [Consulta 5 de Marzo de 2015]
15. SIEMENS. 2008. *Reference Lists SISHIP Drive Lv*. Página 46.
16. Poblet, J 2015 *El Gas Natural en el Transporte Marítimo: La Visión del Usuario*. CotenaVal. Valencia. Páginas 6-8.
17. Poblet, J 2015 *El Gas Natural en el Transporte Marítimo: La Visión del Usuario*. CotenaVal. Valencia. Páginas 8.
18. Maritime Journal. 2013 *Sanmar completes the world's first LNG tug*.  
<http://www.maritimejournal.com/news101/tugs,-towing-and-salvage/sanmar-completes-the-worlds-first-lng-tug> [Consulta 6 de Marzo de 2015]
19. Maritime Journal. 2013 *Sanmar completes the world's first LNG tug*.  
<http://www.maritimejournal.com/news101/tugs,-towing-and-salvage/sanmar-completes-the-worlds-first-lng-tug> [Consulta 6 de Marzo de 2015]
20. Poblet, J 2015 *El Gas Natural en el Transporte Marítimo: La Visión del Usuario*. CotenaVal. Valencia. Páginas 23.
21. 2013 LNG Study Visit onboard MS Stavangerfjord & to Norway
22. Poblet, J 2015 *El Gas Natural en el Transporte Marítimo: La Visión del Usuario*. CotenaVal. Valencia. Páginas 28-33.
23. Zemships. 2008. One hundred passengers and zero emissions. The first ever passenger vessel to sail propelled by fuel cells. Hamburgo. Página 2.

24. Finn, V. 2011. "Fuel Cells in maritime Applications. Challenges, Chances and Experiences." *4th ICHS Conference*. San Francisco, Estado Unidos. Página 15.
25. Zemships. 2008. One hundred passengers and zero emissions. The first ever passenger vessel to sail propelled by fuel cells. Hamburgo. Página 2.
26. Zemships. 2008. One hundred passengers and zero emissions. The first ever passenger vessel to sail propelled by fuel cells. Hamburgo. Página 3 y 4.
27. Zemships. 2008. One hundred passengers and zero emissions. The first ever passenger vessel to sail propelled by fuel cells. Hamburgo. Página 5.
28. Zemships. 2008. One hundred passengers and zero emissions. The first ever passenger vessel to sail propelled by fuel cells. Hamburgo. Página 4.
29. Finn, V. 2011. "Fuel Cells in maritime Applications. Challenges, Chances and Experiences." *4th ICHS Conference*. San Francisco, Estado Unidos. Página 20.
30. Finn, V. 2011. "Fuel Cells in maritime Applications. Challenges, Chances and Experiences." *4th ICHS Conference*. San Francisco, Estado Unidos. Página 20.
31. Finn, V. 2011. "Fuel Cells in maritime Applications. Challenges, Chances and Experiences." *4th ICHS Conference*. San Francisco, Estado Unidos. Página 22.
32. Finn, V. 2011. "Fuel Cells in maritime Applications. Challenges, Chances and Experiences." *4th ICHS Conference*. San Francisco, Estado Unidos. Página 13-15.
33. REACH SUBSEA. 2014. *Dina Star LCV/ROV vessel*. Página 2.
34. SIEMENS. 2014. New diesel electric propulsion system. BLUEDRIVE PlusC. Página 6.
35. ØSTENSJØ REDERI. 2015. <http://ostensjo.no/?fleet=eddaferd> [Consulta 7 de Marzo de 2015]
36. SIEMENS. 2014. New diesel electric propulsion system. BLUEDRIVE PlusC. Página 4.
37. SIEMENS. 2014. New diesel electric propulsion system. BLUEDRIVE PlusC. Página 6.
38. SIEMENS. 2014. New diesel electric propulsion system. BLUEDRIVE PlusC. Página 7.

39. CORVUS. 2014. CASE STUDY: Østensjø PSV, Edda Ferd. Página 1.
40. SIEMENS. 2014. New diesel electric propulsion system. BLUEDRIVE PlusC. Página 7.
41. CORVUS. 2014. CASE STUDY: Østensjø PSV, Edda Ferd. Página 1.
42. IMO. 2015. *List of IMIO Conventions*.  
<http://www.imo.org/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/Default.aspx>  
[Consulta 11 de Marzo de 2015]
43. IMO. 2015. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)  
[http://www.imo.org/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](http://www.imo.org/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)  
[Consulta 11 de Marzo de 2015]
44. GREEN4SEA. 2014. *INTERTANKO launches bunker surcharge clauses for ECAs*.  
<http://www.green4sea.com/intertanko-launches-bunker-surcharge-clauses-ecas/>  
[Consulta 11 de Marzo de 2015]
45. IMO. 2015. *Prevention of Air Pollution from Ships*.  
<http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx> [Consulta 11 de Marzo de 2015]
46. IMO. 2015. *Prevention of Air Pollution from Ships*.  
<http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx> [Consulta 11 de Marzo de 2015]
47. IMO. 2015. Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13.  
<http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-%28NOx%29-%E2%80%93-Regulation-13.aspx> [Consulta 11 de Marzo de 2015]
48. YANMAR. 2010. *MARINE PRODUCT GUIDE. MEDIUM SPEED DIESEL ENGINES*. Página 4.
49. YANMAR. 2010. *MARINE PRODUCT GUIDE. MEDIUM SPEED DIESEL ENGINES*. Página 4.
50. IMO. 2015. *Sulphur oxides (SOx) – Regulation 14*.  
<http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Sulphur-oxides-%28SOx%29-%E2%80%93-Regulation-14.aspx>

es/Sulphur-oxides-(SOx)-%E2%80%93Regulation-14.aspx [Consulta 11 de Marzo de 2015]

51. SIEMENS. 2014. New diesel electric propulsion system. BLUEDRIVE PlusC. Página 5.
52. SIEMENS. 2014. New diesel electric propulsion system. BLUEDRIVE PlusC. Página 5.
53. SIEMENS. 2014. New diesel electric propulsion system. BLUEDRIVE PlusC. Página 5.
54. COMPAÑÍA DE REMOLCADORES IBAIZABAL. 2015. *Ibaizabal Diez*.  
<http://www.remolcadoresibaizabal.com/> [Consulta 17 de Marzo de 2015]
55. JASON FIREFIGHTING. 2011. *FIRE MONITOR. Model MM602HFJ-V-C-02*. Página 6.
56. GENERAL ELECTRIC. 2012. GE Marine and Stationary. Engine Power, Torque and Fuel Data. Página 3.
57. SOLAS, M. 2014. Fotos tomadas por uno mismo durante la realización de las prácticas ya comentadas en la introducción.
58. GENERAL ELECTRIC. 2012. GE Marine and Stationary. Engine Power, Torque and Fuel Data. Página 3.
59. MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARIA GENERAL DE TRANSPORTES. 2011. CERTIFICADO INTERNACIONAL DE PREVENCION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA PARA MOTORES. 16V228MDF. Página 17.
60. GENERAL ELECTRIC. 2012. GE Marine and Stationary. Engine Power, Torque and Fuel Data. Página 3.
61. MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARIA GENERAL DE TRANSPORTES. 2011. CERTIFICADO INTERNACIONAL DE PREVENCION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA PARA MOTORES. 16V228MDF. Página 17.
62. LLOYD'S REGISTER. 2011. Certificate for Oil Engines (Quality Assurance). Certificate no: CGO 1100093/1. Páginas 1 y 2.
63. LLOYD'S REGISTER. 2011. Certificate for Oil Engines (Quality Assurance). Certificate no: CGO LIV 1000158/24. Páginas 1 y 2.

64. SOLAS, M. 2014. Fotos tomadas por uno mismo durante la realización de las prácticas ya comentadas en la introducción.
65. MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARIA GENERAL DE TRANSPORTES. 2011. CERTIFICADO INTERNACIONAL DE PREVENCION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA PARA MOTORES. C9. Página 27.
66. MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARIA GENERAL DE TRANSPORTES. 2011. CERTIFICADO INTERNACIONAL DE PREVENCION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA PARA MOTORES. C9. Página 27.
67. JASON FIREFIGHTING. 2011. JASON FIREFIGHTING AS INSTRUCTION MANUAL. Página 6.
68. HATLAPA. 2010. Deck Machinery - Compressors - Steering Gears. Página 663.
69. SIEMENS. 2008. SISHIP<sup>CIS</sup> ECO PROP. The ECO-friendly PROPulsion for compact ships. Página 4.
70. SIEMENS. 2008. SISHIP<sup>CIS</sup> ECO PROP. The ECO-friendly PROPulsion for compact ships. Página 14.
71. Suarez, D. 2012. *GASES DE ESCAPE Y SISTEMAS ANTICONTAMINACIÓN*.  
<http://www.aficionadosalamecanica.net/emision-gases-escape.htm> [Consulta 3 de Abril de 2015]
72. WÄRTSILÄ. 2013. WÄRTSILÄ ENGINES. WÄRTSILÄ 20 PRODUCT GUIDE. Páginas 1, 12 y 13.
73. WÄRTSILÄ. 2013. WÄRTSILÄ ENGINES. WÄRTSILÄ 20 PRODUCT GUIDE. Páginas 1, 12 y 13.
74. WÄRTSILÄ. 2013. WÄRTSILÄ ENGINES. WÄRTSILÄ 20 PRODUCT GUIDE. Páginas 1, 12 y 13.
75. YANMAR. 2010. *TEST RECORD OF ENGINE*. Página 49.
76. YANMAR. 2010. *DATA SHEET 6EY(A)LW*. Página 1.

77. Trojan Battery Comany. 2014. *L16R-2V Data Sheet*. Páginas 1 y 2.
78. LLOYD'S REGISTER. 2011. Certificate for Oil Engines (Quality Assurance). Certificate no: CGO LIV 1000158/24. Páginas 1 y 2.
79. Damia Solar. 2015. *Batería monoblock de ciclo profundo TAB 250Ah*. [http://www.damiasolar.com/productos/bateria\\_solar/bateria-monoblock-de-ciclo-profundo-tab-250ah\\_da0478\\_37](http://www.damiasolar.com/productos/bateria_solar/bateria-monoblock-de-ciclo-profundo-tab-250ah_da0478_37) [Consulta 1 de Abril de 2015]
80. Trojan Battery Comany. 2014. *L16R-2V Data Sheet*. Páginas 1 y 2.
81. SOLAS, M. 2014. Grafica de las horas de trabajo del remolcador en cada condición de trabajo. Realizada por uno mismo tras la toma de datos en el remolcador.
82. GENERAL ELECTRIC. 2012. GE Marine and Stationary. Engine Power, Torque and Fuel Data. Página 3.
83. MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARIA GENERAL DE TRANSPORTES. 2011. CERTIFICADO INTERNACIONAL DE PREVENCION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA PARA MOTORES. 16V228MDF. Página 17.
84. MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARIA GENERAL DE TRANSPORTES. 2011. CERTIFICADO INTERNACIONAL DE PREVENCION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA PARA MOTORES. C9. Página 27.
85. SHELL ESPAÑA S.A. 2004. *FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD. GASOIL MARINO*. <http://www.ecosmep.com/cabecera/upload/fichas/4902.pdf> [Consulta 31 de Marzo de 2015] Página 6
86. HATLAPA. 2010. Deck Machinery - Compressors - Steering Gears. Página 663.
87. JASON FIREFIGHTING. 2011. JASON FIREFIGHTING AS INSTRUCTION MANUAL. Página 6.
88. WÄRTSILÄ. 2013. WÄRTSILÄ ENGINES. WÄRTSILÄ 20 PRODUCT GUIDE. Páginas 12 y 13.
89. YANMAR. 2010. *TEST RECORD OF ENGINE*. Página 49.

90. GENERAL ELECTRIC. 2012. GE Marine and Stationary. Engine Power, Torque and Fuel Data. Página 3.
91. MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARIA GENERAL DE TRANSPORTES. 2011. CERTIFICADO INTERNACIONAL DE PREVENCION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA PARA MOTORES. 16V228MDF. Página 17.
92. MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARIA GENERAL DE TRANSPORTES. 2011. CERTIFICADO INTERNACIONAL DE PREVENCION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA PARA MOTORES. C9. Página 27.
93. WÄRTSILÄ. 2013. WÄRTSILÄ ENGINES. WÄRTSILÄ 20 PRODUCT GUIDE. Páginas 12 y 13.
94. YANMAR. 2010. *TEST RECORD OF ENGINE*. Página 49.
95. GENERAL ELECTRIC. 2012. GE Marine and Stationary. Engine Power, Torque and Fuel Data. Página 3.
96. MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARIA GENERAL DE TRANSPORTES. 2011. CERTIFICADO INTERNACIONAL DE PREVENCION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA PARA MOTORES. C9. Página 27.
97. MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARIA GENERAL DE TRANSPORTES. 2011. CERTIFICADO INTERNACIONAL DE PREVENCION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA PARA MOTORES. 16V228MDF. Página 17.
98. MINISTERIO DE FOMENTO SECRETARIA GENERAL DE TRANSPORTES. 2011. CERTIFICADO INTERNACIONAL DE PREVENCION DE LA CONTAMINACION ATMOSFERICA PARA MOTORES. C9. Página 27.
99. LLOYD'S REGISTER. 2011. Certificate for Oil Engines (Quality Assurance). Certificate no: CGO LIV 1000158/24. Páginas 1 y 2.
100. BILBAO PORT. 2014. *Suministros de agua y energía eléctrica*.  
[http://www.bilbaoport.es/aPBW/web/es/autoridad/tasas/tasas\\_y\\_tarifas/T8/index.jsp](http://www.bilbaoport.es/aPBW/web/es/autoridad/tasas/tasas_y_tarifas/T8/index.jsp) [Consulta 10 de Abril de 2015]

101. SOLAS, M. 2015. Grafica del consumo del remolcador en un día. Realizada por uno mismo tras el estudio comparativo de todas las condiciones.
102. SOLAS, M. 2015. Grafica de las emisiones de NO<sub>x</sub> del remolcador en un día. Realizada por uno mismo tras el estudio comparativo de todas las condiciones.
103. SOLAS, M. 2015. Grafica de las emisiones de CO<sub>2</sub> del remolcador en un día. Realizada por uno mismo tras el estudio comparativo de todas las condiciones.