



Universidad de Oviedo

ESCUELA SUPERIOR DE LA MARINA CIVIL DE GIJÓN

Trabajo Fin de Grado

ADAPTACIÓN DE UN BUQUE PARA EL
CONSUMO DE DIESEL-OIL

Para acceder al Título de Grado en

MARINA

Autor/a: Mateo Morán Campos

Tutor/a: Noelia Rivera Rellán

junio - 2021

RESUMEN

En 1893 Rudolph Diesel comienza a hacer sus primeras pruebas con un prototipo de la máquina térmica de su diseño. Aunque inicialmente las pruebas con dichos prototipos no fueron del todo fructuosas, la idea se toma como buena. Pocos años después se implementaría en el mundo Naval. Desde esas primeras pruebas y motores con elevados consumos a los productos comerciales disponibles hoy en día la evolución ha sido mayúscula

Aproximadamente la totalidad de los buques en servicio en la actualidad están propulsados y/o electrificados gracias a motores de ciclo diésel lo cual hace que el problema energético se magnifique ampliamente. La Organización Marítima Internacional comienza a considerar el problema en 2011 cuando publica, dentro del Convenio MARPOL, la Resolución MEPC.203(62) en donde define el concepto EEDI (*Energy Efficiency Design Index*) el cual requiere un nivel mínimo de eficiencia energética para los distintos buques, dependiendo su tamaño y tipo. Actualmente se ha ampliado dicha normativa haciendo necesario el tener un plan SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) a bordo. Dentro de las regulaciones dedicadas a la eficiencia energética y lucha contra las emisiones destacan la conocida como *IMO Sulphur Cap 2020* que rebaja el azufre permitido en los combustibles del 3,5 al 0,5% y el objetivo para 2050 que reza por disminuir el total de emisiones de efecto invernadero de la industria naval a un 50% respecto a los niveles de 2008.

En este trabajo se propone el cambio de combustible del buque “Tinerfe” de la Distribuidora Marítima Petrogás S.L.U. para pasar de consumir Fuel-Oil pesado (HFO) a Diesel-Oil (MDO).

El trabajo se divide en 9 capítulos. El primero de ellos consta de una breve introducción sobre la evolución tanto de los buques mercantes como de los combustibles utilizados. En el segundo capítulo se citan los objetivos del trabajo. El tercer capítulo se describen brevemente los motores Diesel de 2 y 4 tiempos. En el cuarto y quinto capítulo se trata los distintos combustibles de forma más amplia que en la introducción y las distintas regulaciones y sanciones aplicables a la flota mercante. En el capítulo 6 se describe el buque estudio de este trabajo. En el capítulo 7 se realiza el análisis del cambio de combustible. En el capítulo 8 se recogen las conclusiones. Por último, el capítulo 9 consta de las referencias bibliográficas.

ABSTRACT

In 1893 Rudolph Diesel began to make his first tests with a prototype of the heat engine of his design. Although initially the tests with these prototypes were not entirely fruitful, the idea is taken as good. A few years later it would be implemented in the Naval world. From those first tests and engines with high consumption to the commercial products available today, the evolution has been capital.

Approximately all the ships in service today are powered and / or electrified thanks to diesel cycle engines, which makes the energy problem greatly magnified. The International Maritime Organization began to consider the problem in 2011 when it published, within the MARPOL Convention, Resolution MEPC.203 (62) where it defines the EEDI (Energy Efficiency Design Index) concept which requires a minimum level of energy efficiency for different vessels, depending on their size and type. Currently this regulation has been expanded making it necessary to have a SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) on board. Among the regulations dedicated to energy efficiency and the fight against emissions, the one known as IMO Sulfur Cap 2020 stands out, which reduces the sulfur allowed in fuels from 3.5 to 0.5% and the objective for 2050 that prays to reduce the total of greenhouse gas emissions from the shipbuilding industry to 50% compared to 2008 levels.

In this work, it is proposed to change the fuel of the ship "Tinerfe" of the Distribuidora Marítima Petrogás S.L.U. to go from consuming Heavy Fuel-Oil (HFO) to Diesel-Oil (MDO).

The work is divided into 9 chapters. The first one consists of a brief introduction on the evolution of both merchant ships and the fuels used. In the second chapter the objectives of the work are cited. The third chapter briefly describes 2 and 4-stroke Diesel engines. The fourth and fifth chapters deal with the different fuels in a broader way than in the introduction and the different regulations and sanctions applicable to the merchant fleet. Chapter 6 describes the study vessel for this work. In chapter 7 the fuel change analysis is performed. In chapter 8 the conclusions are collected. Finally, chapter 9 consists of the bibliographic references.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. CONTEXTO HISTÓRICO	1
1.2. COMBUSTIBLES	3
1.3. INTERES SOCIOECONÓMICO	6
2. OBJETIVOS.....	9
3. SISTEMAS DE PROPULSIÓN MARINOS	10
3.1. MOTORES DIESEL	10
3.1.1. MOTORES DE 2 TIEMPOS.....	10
3.1.2. MOTORES DE 4 TIEMPOS.....	12
4. ACTUALES COMBUSTIBLES MARINOS	17
4.1. INTRODUCCIÓN	17
4.2. COMBUSTIBLES RESIDUALES	18
4.3. COMBUSTIBLES DESTILADOS.....	19
5. CONTROL DE EMISIONES Y SANCIONES	21
5.1. SANCIONES EN LAS ZONAS ECA DE LA U.E.....	22
5.2. SANCIONES EN LAS ZONAS ECA DE CHINA.....	23
6. BUQUE ESTUDIO TINERFE B/Q	24
6.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL BUQUE	25
6.2. MOTOR PRINCIPAL	26
6.3. SISTEMA DE COMBUSTIBLE	29
7. CAMBIO DE COMBUSTIBLE	31
7.1. PASOS A REALIZAR PARA EL CAMBIO DE COBUSTIBLE.....	31

7.1.1. CAMBIO DE COMBUSTIBLE DE FUEL A DIESEL DURANTE UNA PARADA.....	31
7.1.2. CAMBIO DE COMBUSTIBLE DE FUEL A DIESEL DURANTE LA NAVEGACIÓN	31
7.2. PRUEBA EN NAVEGACIÓN	32
7.3. CONCLUSIONES DE LA PRUEBA	35
7.4. NECESIDAD DE LA INSTALACIÓN DE UN ENFRIADOR	36
7.5. POSIBLE EXCESO DE VAPOR.....	43
8. CONCLUSIONES	47
9. BIBLIOGRAFÍA.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Navío de guerra "El Napoléon"	2
Figura 2: Actuales zonas ECA	5
Figura 3: Actuales y futuras zonas ECA	6
Figura 4: Transporte marítimo global del petróleo	6
Figura 5: Buque Mencey.....	7
Figura 6: Buque Tinerfe	8
Figura 7: Distribución motor diésel marino	11
Figura 8: Motor MAN B&W S70ME lento de 2 tiempos.....	12
Figura 9: Fases del motor diésel 4 tiempos.....	13
Figura 10: Diagrama de distribución de avances/retrasos en motor diésel de tiempos	15
Figura 11: Flota mercante mundial por tipo de buque	16
Figura 12: tráfico marítimo sobre la costa asturiana	21
Figura 13: Buque Tinerfe	24
Figura 14: Disposición de los tanques de carga	26
Figura 15: Sección transversal del motor principal.....	28
Figura 16: Navegación entre Palma e Ibiza.....	32
Figura 17: Cámara termográfica fluke TiS60.....	33
Figura 18: Termografía de la bomba de inyección N°1	33
Figura 19: Local de purificadoras.....	37
Figura 20: Local de purificadoras (2).....	37
Figura 21: Enfriador de agua de baja.....	38
Figura 22: Plano del Sistema de Combustible (modificación)	40
Figura 23: Plano de las líneas de instalación del enfriador de MDO	41
Figura 24: Plano del agua de refrigeración de baja (Modificación)	42
Figura 25: Caldera "Miura": modo de atomización.....	44
Figura 26: Caldera "Miura": modo de combustión	44
Figura 27: Plano del economizador	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Variación de las emisiones de óxidos de carbono	5
Tabla 2: Sanciones zonas ECA en la Unión Europea.....	22
Tabla 3: Flota y capacidades de carga de cada buque	25
Tabla 4: Características del IFO 380.....	29
Tabla 5: Temperaturas obtenidas en las pruebas	34
Tabla 6:Características técnicas del enfriador de MDO	39
Tabla 7: Características técnicas del condensador de purgas	40

1. INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO HISTÓRICO

La idea de utilizar máquinas de vapor como medio de propulsión en los buques nace de la mano de Denis Papin inventor físico Frances («Denis Papin» s. f.). Pero no fue hasta 1804 cuando el ingeniero Estadounidense Roberto Fulton, tras varios intentos fallidos mandó construir en Inglaterra a la compañía “Boulton and Watt” una máquina de vapor que instalaría en su buque, el “*Clermont*”, consiguiendo recorrer una distancia de 120 millas entre Nueva York y Albany, a una velocidad aproximada de 4 nudos. Quedando desde esa fecha, establecida la navegación mediante barcos impulsados a vapor en los grandes lagos y ríos de América. Pero estas máquinas propulsoras aún estaban lejos de poder navegar por mar abierto debido, entre otros motivos, a su gran volumen, escasa potencia e imperfecciones técnicas; quedando restringida la navegación únicamente a los grandes ríos y lagos de América («first steam ship» s. f.).

Con el paso de los años gracias al desarrollo tecnológico de la época y las experiencias obtenidas de los buques fluviales se comenzó a implantar la propulsión a vapor en los buques de la marina militar estadounidense, pero presentaban grandes inconvenientes, como por ejemplo, la elevada posición de los ejes motores, que hacía que estuvieran expuestos a las balas enemigas, el tamaño de las ruedas y los tambores que dificultaban el posicionamiento de la artillería en los costados, etc... Por estas razones se llega a la conclusión de la necesidad de implantar una forma alternativa de propulsión que solvente estos problemas («Luis Puig Roca (Escuela Náutica Barcelona)» s. f.).

En 1852 Charles Henri Dupuy de Lôme (arquitecto naval Frances) decide introducir la hélice como sistema de propulsión, hecho que provoca un punto de inflexión en la evolución del desarrollo de los buques («Charles Henri Dupuy de Lôme» 2020).

En la Figura 1 se muestra “El Napoléon” primer navío en el que la máquina de vapor acciona una hélice para la propulsión. Este buque fue construido específicamente para uso militar. Su éxito llegó a alcanzar tal nivel que obligó a la reconstrucción del resto de flotas militares del mundo («Napoléon (1852)» s. f.).

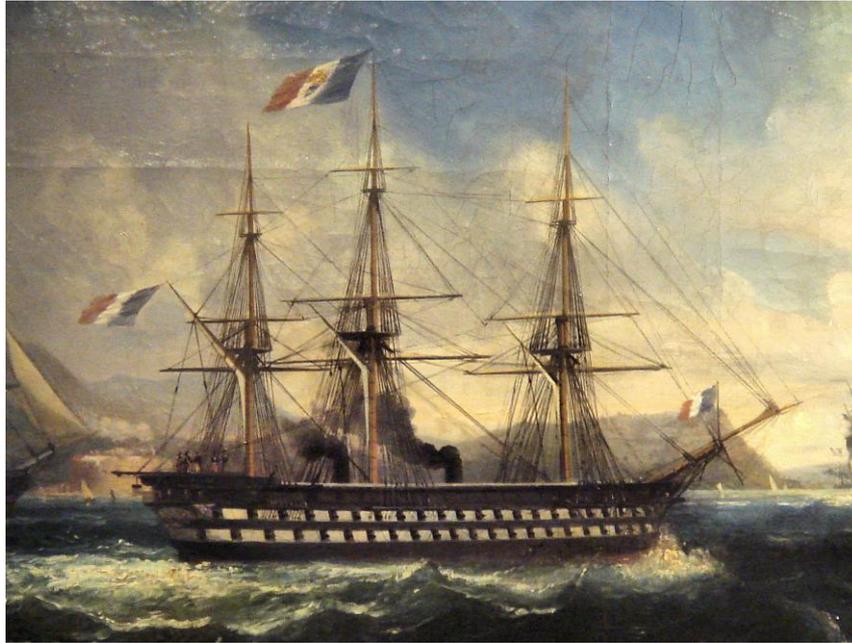


Figura 1-Navío de guerra "El Napoléon" («Napoléon (1852)» s. f.).

Tras el gran éxito que tuvo la introducción de la hélice como modo propulsor en la marina militar, la marina civil rápidamente la introdujo, creándose de esta forma buques cada vez de mayor tonelaje para satisfacer las necesidades comerciales de la época; sin embargo el accionamiento de la hélice seguía siendo mediante maquinas térmicas de vapor, y eso acarrea problemas, debido a la relación entre el elevado número de revoluciones del eje de la turbina con el número relativamente pequeño de revoluciones de la hélice, lo que originó una nueva evolución en el sistema de propulsión naval para solventar estos problemas («Luis Puig Roca (Escuela Náutica Barcelona)» s. f.).

Después de muchas pruebas erróneas y costosas, finalmente en 1897 el ingeniero Rudolf Diesel, harto de los viejos motores de vapor que eran excesivamente grandes e ineficientes, presentó su primer motor construido en los talleres de la “Maschinenfabrik, Augsburg, Nürnberg” (M.A.N) siendo éste el primer motor alternativo de combustión interna, produciéndose un giro revolucionario en la evolución de los motores marinos (Henry Crew 1940).

Rápidamente tras el innegable éxito del motor alternativo de combustión interna, ese mismo año fueron solicitadas varias licencias, entre ellas a las casas inglesas “Mirrless” y “Bickerton and Day”; la casa suiza “Sulzer”; la casa belga “Carels”; y finalmente la casa rusa “Nobel”.

A partir de este momento la evolución de los motores marinos seguirá la línea establecida por Rudolf Diesel, siendo su sistema de propulsión la tónica habitual, tanto de la

marina civil como la militar, llegando hasta nuestros días, en los que la propulsión mediante motores alternativos es la más habitual (José Adrián Rodríguez Ponce, s. f.).

1.2 COMBUSTIBLES

Los primeros motores diésel marinos utilizaban fuelóleos pesados como principal fuente de alimentación. El fuelóleo pesado es un combustible residual que sale de la destilación del crudo, y la calidad de este depende de la cantidad de crudo utilizado en la refinería.

Según la norma ISO (Organización Internacional de Estandarización) 8217 los combustibles marinos se dividen en 2 grandes grupos:

- Destilados.
- Residuales (fuelóleos pesados).

Aunque el desarrollo tecnológico ha hecho posible el poder utilizar combustibles alternativos, lo cierto es que hoy en día la gran mayoría de motores diésel marinos de media y baja velocidad están diseñados para funcionar con los mismos fueles, siendo el HFO (High Fuel-Oil) el más utilizado («Fuelóleo pesado (HFO) | Glosario | Oiltanking» s. f.).

La utilización de este tipo de combustible puede llegar a causar diferentes tipos de riesgos, pudiéndose dividir en 2 grupos:

1. Riesgos para la salud, entre los que se pueden destacar:
 - a. Toxicidad, ya sea por vía oral, por inhalación o por transmisión cutánea.
 - b. Corrosión en la piel, en los que se utilizaron conejos en un estudio para comprobarlo, y dando como resultado irritaciones leves en los mismos. (API, 1980).
 - c. Carcinogenicidad, utilizando animales en el estudio del mismo mediante una exposición al producto, llegándose a la conclusión de que el HFO es cancerígeno. (API 1989).
2. Riesgos para el medio ambiente, entre los que destacan:

INTRODUCCIÓN

- a. Contaminación marina (a corto plazo), en los que se utilizaron peces y algas marinas y se introdujo una muestra de HFO, y se pudo comprobar una variación tóxica de los mismos (*EMBSI 2008a, 2008b, 2008c*).
- b. Contaminación marina (a largo plazo), el estudio que recoge “*Daphnia magna*” muestra que exposiciones de muestras de HFO varía su toxicidad, con un valor mínimo de 0,1 mg/l. (*EMBSI 2012*).
- c. Contaminación ambiental, debido principalmente a la composición del HFO (hidrocarburos) en los que se considera potencialmente bioacumulables¹. («CONCAWE.Eu» s. f.).

Durante más de un siglo se ha utilizado el HFO como combustible principal. Éste combustible produce gases contaminantes durante el proceso de combustión debido a su origen fósil, y principalmente emiten 2 tipos de gases: los “no tóxicos” y los “tóxicos”, entrando dentro de éste segundo grupo sustancias tales como el monóxido de carbono, dióxidos de azufre, plomo, hidrocarburos, partículas de hollín... (Jonathan Eduardo González Gil 2018).

La Organización Mundial de la Salud considera la contaminación atmosférica como una de las más importantes prioridades mundiales en salud («World Health Organization» s. f.).

En lo que respecta al transporte marítimo el principal problema concierne a los altos contenidos de óxidos de azufre, presentes en los combustibles, los cuales pueden producir efectos tales como problemas respiratorios, inflamación de las vías respiratorias, edemas pulmonares, colapsos circulatorios e incluso paros cardiacos. El dióxido de azufre también favorece los problemas de asma y bronquitis crónica, así como el aumento de la morbilidad y mortalidad en personas jóvenes y de elevada edad («anexo V Directiva 1999/30/CE» s. f.).

Para minimizar el riesgo para la salud, desde la Comisión Europea se decidió delimitar unas zonas que son más sensibles a la contaminación y exigen límites estrictos de azufre en los combustibles de los buques que naveguen por esas zonas («Revista de Obras Públicas nº 3.537. Noviembre 2012» s. f.).

Estas zonas son las denominadas zonas “ECA” (*Emission Control Areas*) y actualmente están constituidas por la zona del mar Báltico, la zona del Mar del Norte, la zona

¹ La “*Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos*” define el “factor de bioconcentración” como la relación de concentraciones de productos químicos entre un organismo y el agua de sus alrededores.

de Norteamérica y la zona del Mar Caribe de los Estados Unidos, tal y como se puede observar en la Figura 2 («Zonas ECA» s. f.).



Figura 2-Actuales zonas ECA («cadena de suministro Maersk» 2014)

Con el paso del tiempo, la Organización Marítima Internacional ha ido variando la tasa de emisiones permitidas de óxidos de azufres medido en % m/m². (ver Tabla 1) tanto dentro de las zonas “ECA” como fuera («Organización Marítima Internacional (OMI)» s. f.).

Tabla 1-Variación de las emisiones de óxidos de carbono («Zonas ECA» s. f.)

Fuera de las zonas ECA	Dentro de las zonas ECA
4,5% m/m (Anterior a enero 2012)	1,5% m/m (Anterior a julio 2010)
3,5% m/m (Posterior a enero 2012)	1,0% m/m (Posterior a julio 2010)
0,5% m/m (A partir de enero 2020)	0,1% m/m (Posterior a enero 2015)

Como se muestra en la Figura 3, es posible que en el futuro estas zonas “ECA” se amplíen (zona naranja), y con ello, los buques que no cumplan con las normativas de emisiones estarán expuestos a sanciones económica e incluso se les podrá restringir la entrada a estas aguas, repercutiendo negativamente al comercio marítimo internacional.

² El porcentaje de azufre se refiere a los gramos de cenizas de azufre encontradas después de la combustión, entre los gramos de muestra empleada.

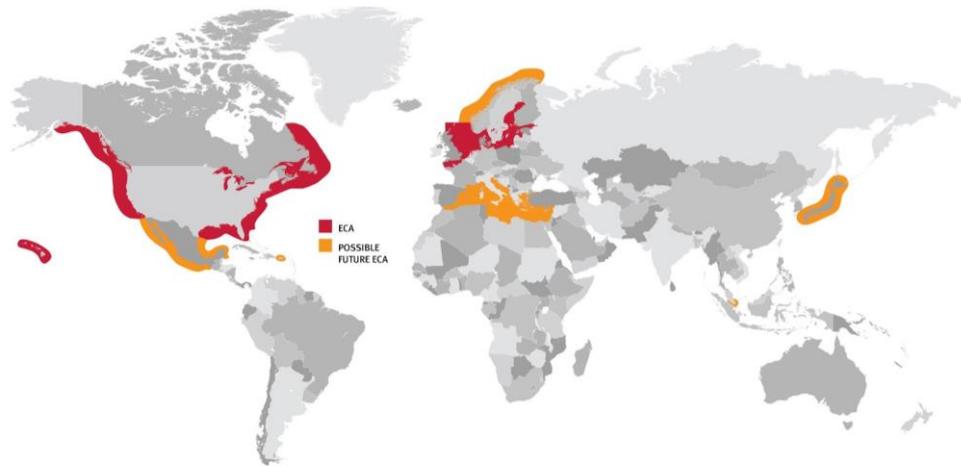


Figura 3-Actuales y futuras zonas ECA («Zonas ECA» s. f.)

1.3 INTERES SOCIOECONÓMICO

El buque es el modo de transporte más eficiente y constituye uno de los pilares fundamentales del comercio global ya que el 90% del comercio mundial se realiza por vía marítima. El transporte por mar se considera parte de la estrategia de diversificación de rutas y de fuentes de energía de la Unión Europea. El 90% del petróleo se transporta por mar, y crece además la tendencia al transporte del gas natural licuado. La flota mundial ha mantenido un crecimiento constante, en la Figura 4 se muestra el flujo de transporte marítimo global del petróleo en miles de toneladas anuales («Página principal de la Junta de Castilla y León» s. f.).

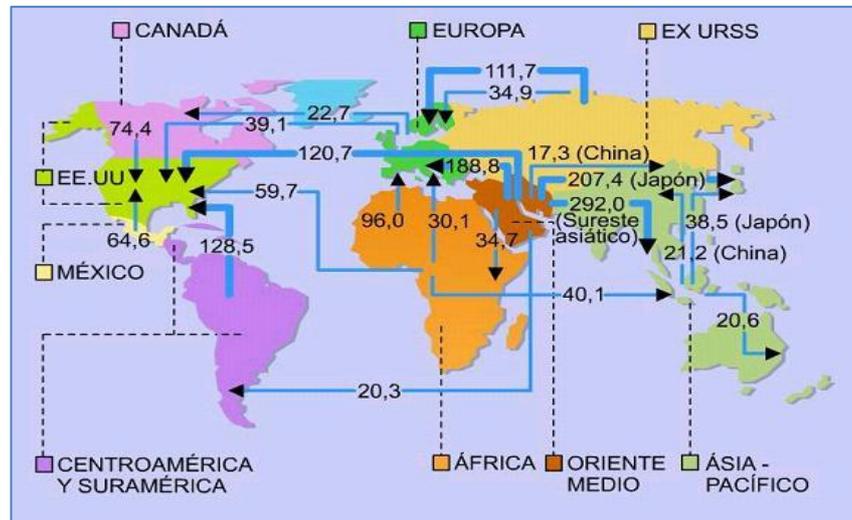


Figura 4-Transporte marítimo global del petróleo («Petroleum Products» s. f.).

Los buques tanque son una amplia familia de buques cuya misión es la de transportar cargas líquidas (petróleo, alcohol, ácidos, gases licuados...) y se caracterizan por su gran tamaño, como es el caso de los petroleros de crudo (que pueden llegar hasta los 500 metros de eslora), además de los petroleros de crudo, a ésta familia lo constituyen también los petroleros de productos (que transportan refinados del crudo, como las gasolinas, gasoil...), los buques quimiqueros (como su nombre indica, transportan productos químicos como ácidos, aceites...) y los buques gaseros (que transportan gases licuados del petróleo).

Centrándonos en esta amplia familia de buques, esto nos sirve para hacernos una idea de la importancia que tienen dichos buques y de cómo éstos han de modificarse respecto a las nuevas normativas de contaminación para poder seguir con su labor de transportar el petróleo y sus refinados alrededor de todo el mundo.

El principal problema que se plantea es que si los buques no se “actualizan” no podrán desempeñar su labor de hacer llegar el petróleo a su destino, viéndose algunas zonas bastante perjudicadas (principalmente islas) en las que, debido a diferentes causas (normalmente geográficas), les sea imposible recibir esta materia prima de otra forma, y como consecuencia de ello no poder abastecer las necesidades energéticas que requieren.

Un claro ejemplo de este problema es el “Mencey” (ver *Figura 5*), buque de la empresa Distribuidora Marítima Petrogás S.L.U. (Sociedad Limitada Unipersonal) encargado del abastecimiento de petróleo y refinados exclusivamente a las Islas Canarias.



Figura 5-Buque Mencey (Petrogás - Distribuidora Marítima, s. f.-a).

INTRODUCCIÓN

Si por algún motivo este buque deja de ser operativo, dejaría sin suministros a las Islas, dejándolas sin energía, puesto que, por mucho que se invierta en energías renovables la tecnología aún no está lo bastante avanzada como para prescindir del uso del petróleo, siendo éste esencial para abastecer la demanda eléctrica cumpliendo con las exigencias energéticas que existen hoy en día («Concepción M. A. Pérez Hernández» s. f.).

En este trabajo se propone el cambio de combustible “retrofit” de la planta principal del buque “Tinerfe” (ver *Figura 6*) de la Distribuidora Marítima Petrogás S.L.U. para pasar de consumir Fuel-Oil pesado (HFO) a Diesel-Oil (MDO) para alcanzar los niveles de SO_x impuestos por la O.M.I (Organización Marítima Internacional).



Figura 6-Buque Tinerfe (Petrogás - Distribuidora Marítima, s. f.-b)

2. OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo es comprobar si se puede realizar el cambio de combustible de un combustible residual a un combustible destilado en el buque Tinerfe de la compañía marítima Petrogás.

Lo anterior tiene una importancia relevante en el contexto científico-técnico debido a la necesidad de cumplir con la tasa de emisiones impuesta por la Organización Marítima Internacional y con ello reducir las emisiones de gases CO₂, NO_x y SO_x de las máquinas térmicas. Para alcanzar la conclusión de este objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Conocer las diferencias entre los combustibles marinos residuales y destilados
- Conocer las regulaciones sobre el control de emisiones aplicables a los barcos mercantes
- Saber que pasos son necesarios para realizar el cambio de combustible
- Estudiar la viabilidad del cambio de combustible

3. SISTEMAS DE PROPULSIÓN MARINOS

En este capítulo se describen los principales tipos de motores utilizados para la propulsión en los buques de la marina mercante, explicando los rasgos generales del principio de funcionamiento de cada uno de ellos.

3.1 MOTORES DIESEL

En la actualidad gracias a su gran economía de funcionamiento y principalmente por su bajo consumo (alrededor de 135 g/CV Hora) es el método más común y usado en la propulsión de los buques mercantes (Marina, s. f.).

Los motores diésel entran dentro del grupo de motores térmicos puesto que la transformación de la energía química del combustible en energía térmica se produce dentro del propio cilindro mediante un proceso de combustión.

La energía térmica obtenida se transforma en energía mecánica gracias al movimiento alternativo de los pistones, y mediante el sistema biela-manivela³ se transmite el giro hacia el cigüeñal, el cual está acoplado al eje que mueve la hélice produciendo el avance del barco.

Existe una amplia clasificación de motores diésel marinos según su tipo de construcción, disposición de cilindros, velocidad de giro... pero principalmente existen 2 grandes grupos:

3.1.1 MOTORES DE 2 TIEMPOS.

Los motores de dos tiempos son motores de baja velocidad (entre 60 y 240 rpm) y con grandes desplazamientos (hasta 3 m³/cilindro) y normalmente se usa para la propulsión de graneleros, portacontenedores, de carga general, buques tanque de gran tamaño y en algunos buques ro-ro (Marina, s. f.).

En la Figura 7 se muestra la disposición que tienen estos motores en los buques mercantes.

³ El mecanismo de biela-manivela es un mecanismo que transforma un movimiento circular en un movimiento de traslación, o viceversa.

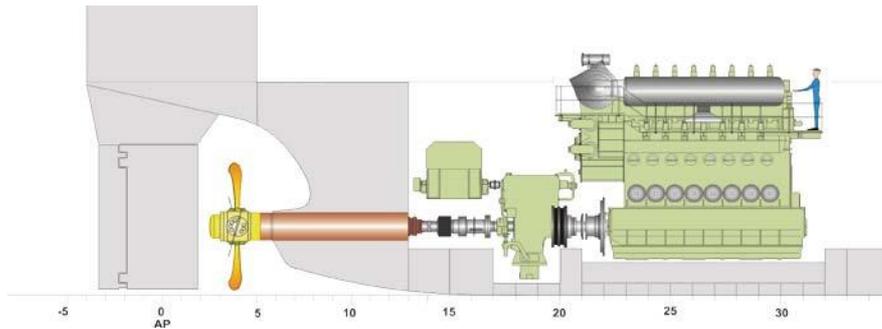


Figura 7-Distribución motor diésel marino («Technical Courses :: Cursos Técnicos» s. f.)

El funcionamiento de los motores diésel comienza en las lumbreras de admisión, que son unos orificios dispuestos alrededor de la parte inferior de cada cilindro, permitiendo el paso del aire de barrido hacia el interior de estos. La admisión es controlada por el pistón de tal forma que “tapa” y “destapa” las lumbreras según el cilindro se encuentre en la parte inferior o superior de su carrera. En lo que respecta al combustible, se utilizan bombas de inyección (entre 2 o 3 inyectores por cilindro) para introducir el combustible dentro del cilindro.

El ciclo de estos motores consiste en 2 carreras, de ahí su nombre:

- Expansión / Escape: Es la carrera que produce trabajo útil. El émbolo realiza un movimiento descendente hacia el punto muerto inferior (PMI) debido a la combustión producida en la parte superior de la carrera, y usa la expansión de los gases para realizar ese movimiento descendente. Una vez en el PMI los gases de la combustión son expulsados por la válvula de escape y las lumbreras de admisión introducen aire fresco al cilindro para repetir el ciclo.
- Admisión / Compresión: Durante esta carrera el émbolo realiza un movimiento ascendente, comprimiendo todos los gases que hay en el cilindro hasta el punto muerto superior (PMS) donde se produce la ignición. La inyección de combustible se produce justo antes de que el émbolo llegue al PMS.

En la Figura 8 se muestra una imagen de un cilindro del motor “MAN B&W S70ME”, motor diésel de 2 tiempos:

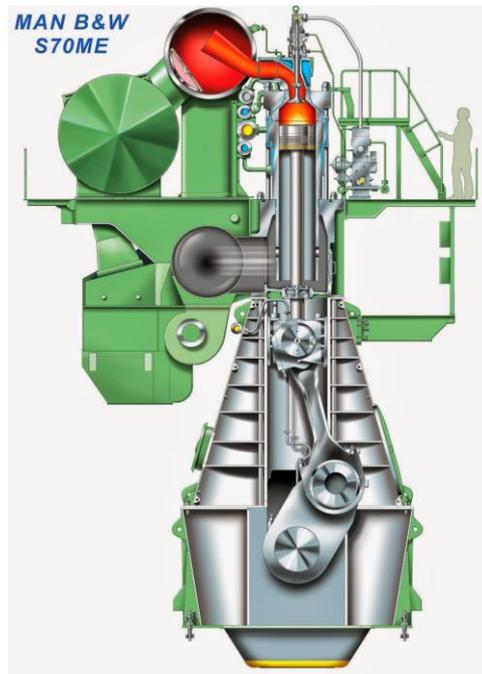


Figura 8-Motor MAN B&W S70ME lento de 2 tiempos («Technical Courses :: Cursos Técnicos» s. f.)

3.1.2 MOTORES DE 4 TIEMPOS.

Los motores de cuatro tiempos son el otro gran grupo dentro de los motores de combustión interna alternativos utilizados en los buques mercantes. Este tipo de motores se utilizan en buques más pequeños a los que utilizaban la propulsión por el ciclo de 2 tiempos. También se suelen utilizar como motores auxiliares de los buques de gran tamaño para la generación de energía.

Las velocidades de giro son mayores en este tipo de motores con respecto a los de 2 tiempos, pudiendo llegar hasta las 1.200 rpm y, a diferencia de los anteriores, estos motores requieren de un engranaje reductor para transmitir el giro a la hélice y que ésta produzca el desplazamiento del barco (José Adrián Rodríguez Ponce, s. f.).

El funcionamiento teórico se divide en las siguientes fases (ver Figura 9):

- Admisión: El émbolo comienza esta fase en el PMS del cilindro y empieza a descender hasta llegar al PMI. Durante este descenso, el émbolo hace vacío en el interior del cilindro favoreciendo la introducción del aire fresco en el mismo gracias a la apertura de la válvula de admisión.
- Compresión: El émbolo comienza el movimiento ascendente, desde el PMI hacia el PMS. Durante esta fase la válvula de admisión y escape permanecen

cerradas, provocando que se compriman los gases del interior del cilindro aumentando la presión y temperatura.

- Inyección: Es la fase más rápida del ciclo. El émbolo se encuentra en el PMS y en ese instante se inyecta el combustible por medio de los inyectores, produciéndose la combustión.
- Expansión: La llamada “fase útil” puesto que el émbolo utiliza la fuerza de la expansión de los gases de la combustión para pasar del PMS al PMI, transmitiendo el movimiento descendente al giro del cigüeñal por medio del sistema biela-manivela.
- Escape: El pistón vuelve a subir desde el PMI hacia el PMS permaneciendo la válvula de escape abierta lo que provoca que los gases de la combustión salgan y de esta forma poder comenzar el ciclo nuevamente.

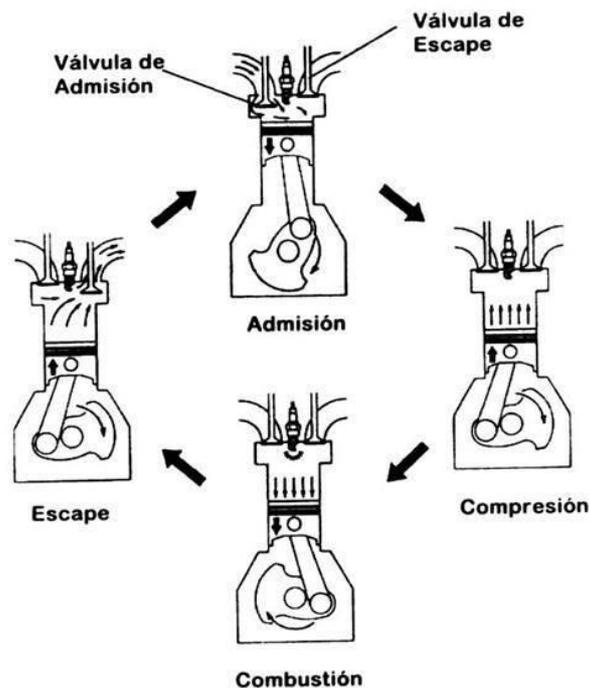


Figura 9-Fases del motor diésel 4 tiempos (EspacioCoches.com, s.f.)

En la práctica, para conseguir mejorar las prestaciones del motor se realizan una serie de avances y retrasos en las válvulas de admisión y de escape, así como en el momento de la inyección, para conseguir una mejora en la velocidad con la que se vacía/llena el cilindro de los gases de combustión, aumentando su rendimiento:

- a- Avance en la apertura de admisión (AAA): Teóricamente la válvula de admisión se abre justo cuando el émbolo se encuentra en el PMS, pero al realizar un pequeño

avance en la admisión, se consigue que ingrese al cilindro aire fresco por más tiempo, consiguiendo un mejor llenado.

- b- Retraso del cierre de admisión (RCA): Por la misma razón que antes, al mantener la válvula de admisión abierta una vez el émbolo llegue al PMI, permitimos que siga entrando más aire al cilindro, lo que permite un llenado aún mayor con su consiguiente aumento del rendimiento del motor.
- c- Avance de la apertura de escape (AAE): Gracias a este avance se consiguen vaciar los gases de la combustión del cilindro de forma más rápidamente, aunque también hay que tener en cuenta que al realizar este avance se pierde potencia en el motor, ya que los gases están empujando el émbolo del pistón desde el PMS al PMI realizando trabajo útil, pero ésta pérdida de potencia es baja comparada con el aumento de potencia que se consigue al aumentar la velocidad de vaciado del cilindro.
- d- Retraso del cierre de escape (RCE): Al igual que en los casos anteriores, debido a la inercia que tienen los gases de escape que se encuentran dentro del cilindro, se retrasa el cierre de la válvula de escape para que puedan continuar vaciando el cilindro.
- e- Avance de la inyección (AE): Desde que se comienza a inyectar el combustible pulverizado en el cilindro hasta que éste combustiona demora un pequeño periodo de tiempo, y para compensarlo se avanza la inyección para que justo cuando el émbolo alcance el PMS comience la combustión.

Ahora bien, al realizar estos pequeños ajustes se debe tener en cuenta que, debido al avance de la apertura de admisión y el retraso del cierre de escape, existe un pequeño periodo de tiempo en el cual se mantienen abiertas tanto la válvula de admisión como la de escape. Es el llamado cruce de válvulas, y un cruce de válvulas amplio permite al motor alcanzar un mayor número de rpm, en cambio su funcionamiento a rpm bajas reduciría el rendimiento del mismo entregando menos potencia y una disminución en el par motor; sin embargo, al tener un cruce de válvulas corto permitiría obtener un rendimiento mayor del motor a bajas rpm, en contra reduciría su rendimiento a altas vueltas.

En la Figura 10 se pueden observar de forma clara estas pequeñas variaciones superpuestas sobre el giro del cigüeñal.

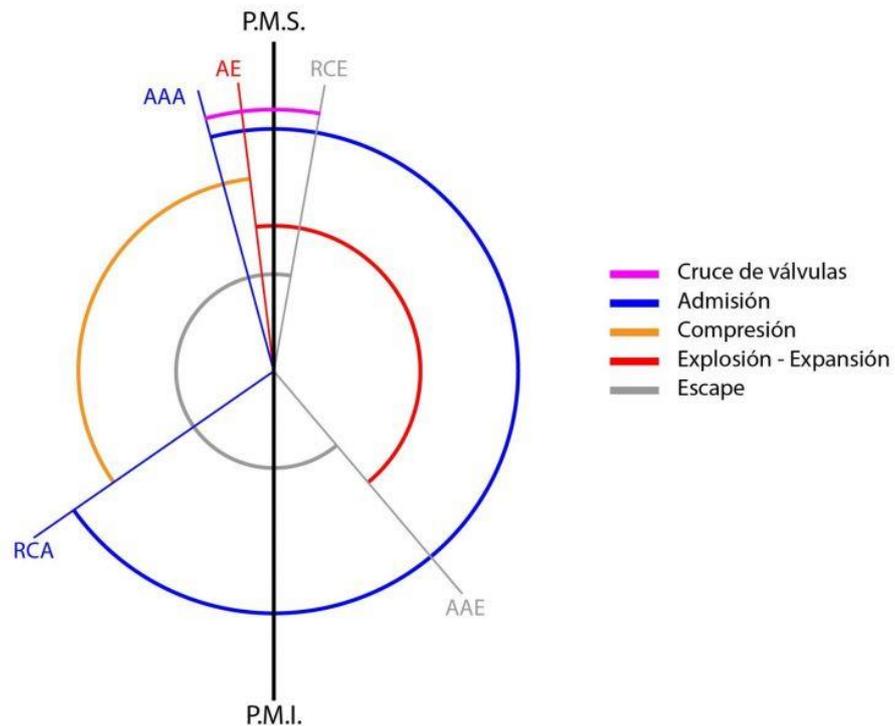


Figura 10-Diagrama de distribución de avances/retrasos en motor diésel de tiempos («<https://www.diariomotor.com>» s. f.)

La marina mercante actual se puede dividir en la siguiente clasificación según la función que desempeñe:

- Buques graneleros.
- Buques tanque (incluyendo petroleros, gaseros y quimiqueros).
- Buques portacontenedores.
- Buques de carga general.

En enero del 2020 se registraron, según las “World Fleet Statistics” publicadas por “IHS Markit”, un total de 61.197 buques mercantes (cuya carga supere las 100 GT⁴) una cifra al alza comparada con la registrada en 2019; y en la que destacan los buques graneleros con un 35,8% de la flota total, seguido de los petroleros con un 21,6% y por los portacontenedores con un 18,6%, éste último registró un aumento de un 4,1% respecto al año anterior, pero solo

⁴El GT (Gross Tonnage) es un parámetro que se usa en los buques para cuantificar la carga que puede albergar y así realizar clasificaciones entre buques.

SISTEMAS DE PROPULSIÓN MARINOS

cuantifica un aumento de 0,1% en la flota mundial debido al elevado número de unidades amarradas («tribuna_bia0520.pdf» s. f.).

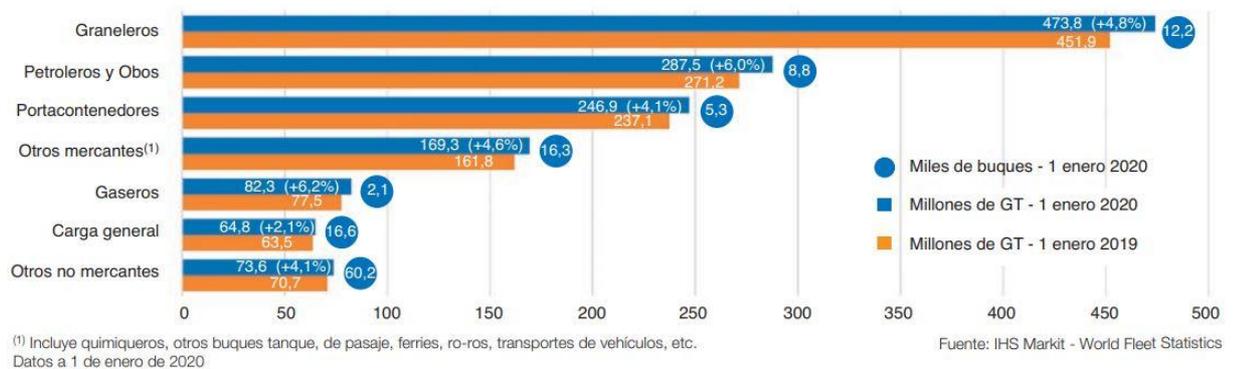


Figura 11-Flota mercante mundial por tipo de buque

Debido a que la gran mayoría de estos buques utilizan el motor diésel para la propulsión y generación de energía eléctrica, se pone de manifiesto la importancia que tienen este tipo de motores dentro de la marina mercante. (Marina, s. f.)

Actualmente las empresas más importantes en el sector de la construcción de estos motores son:

- MAN B&W.
- Wärtsilä Corporation.
- Mitsubishi Heavy Industries.
- MAK (CAT).
- Rolls-Royce.
- HiMSEN.
- Yanmar.

4. ACTUALES COMBUSTIBLES MARINOS

En este capítulo se hace un tratamiento más profundo sobre los combustibles utilizados en los buques mercantes, y sobre cómo estos han ido evolucionando de la mano de las nuevas tecnologías en el desarrollo de los nuevos motores marinos y en función de los cambios legislativos sobre la prevención de la contaminación y el medio ambiente.

4.1 INTRODUCCIÓN

Combustible es cualquier material capaz de liberar energía cuando se oxida de forma violenta con desprendimiento de calor. Supone la liberación de una energía de su forma potencial (energía de enlace) a una forma utilizable sea directamente (energía térmica) o energía mecánica (motores térmicos) dejando como residuo calor, dióxido de carbono y algún otro compuesto químico («Combustible» 2021).

La ISO divide los diferentes tipos de combustibles según sus características por medio de una combinación de números y letras, así como el establecimiento de unos valores máximos de contenido de agua, cenizas, azufre, etc. presentes en los combustibles, creándose la norma ISO 8217 («retrieve.pdf» s. f.).

Según esta norma, la primera letra indica el origen del combustible, de forma que la letra D hace referencia a un combustible destilado y la letra R a un combustible residual.

La segunda letra indica el uso, designan la letra M para uso marino.

La tercera letra (X, A, B, C, E, F, etc.) indica características propias del combustible, como puede ser la densidad, residuos carbonosos, cenizas, etc.

El número que lo sigue corresponde con el índice de viscosidad, a una temperatura de 50 °C y medida en centistokes (cSt), o lo que es lo mismo, en mm² / s.

Existen gran variedad de combustibles marinos, siendo los más usados el:

- Marine Gasoil (MGO).
- Marine Diesel Oil (MDO).
- Aceite de Combustible Intermedio (IFO):el IFO 180 y el IFO 380.

4.2 COMBUSTIBLES RESIDUALES

Este tipo de combustible es obtenido como residuo del proceso de refinado del petróleo crudo.

El origen del petróleo comienza con el plancton⁵ existiendo 2 tipos, el “fitoplancton”, organismo fotosintético⁶, y el “zooplancton”, que se alimenta del fitoplancton.

Una vez muere el fitoplancton, éste deja de flotar y se hunde en el fondo del océano mezclándose con diversos sedimentos minerales que lo cubren durante el transcurso de miles de años, creando una capa de barro que impide que las bacterias tengan acceso al fitoplancton muerto evitando que se pudra.

Cuanto más tiempo pase, más sedimentos se acumularán encima, con lo que la presión sobre la materia orgánica aumentara, al igual que la temperatura.

Una vez exista una capa suficientemente grande de material acumulado sobre los restos del fitoplancton, entra en acción la química de los organismos muertos, transformándolos en querógeno (rocas sedimentarias compuestas de una mezcla de compuestos químicos orgánicos).

Con el paso del tiempo (del orden de millones de años) el agua, el dióxido de carbono y el oxígeno se extraen del querógeno debido al aumento de presión y de temperatura por la continua acumulación de sedimentos, haciendo que la mezcla se convierta en petróleo crudo (elblogverde.com 2019). Estos combustibles se clasifican mediante la norma ISO 8217 explicada en el apartado anterior.

Para poder entender el cambio que experimenta el sector marino en el uso de los combustibles es necesario entender que la característica más relevante de estos combustibles es su tendencia a contener trazas de metales pesados lo que origina su elevada densidad e índice de viscosidad.

El HFO 700 es el combustible con mayor índice de viscosidad dentro de los combustibles residuales marinos. El número indica la máxima viscosidad medida en

⁵ Se denomina “plancton” al conjunto de organismos, principalmente microscópicos, que flotan en aguas saladas o dulces, más abundantes hasta los 200 metros de profundidad aproximadamente.

⁶ Un organismo fotosintético es aquel que saca su energía de la luz solar, tomando dióxido de carbono de su entorno y liberando oxígeno.

centistokes (cSt) de tal forma que cuanto mayor sea el número, más viscosidad tendrá, y con ello más residuos, haciéndolo “menos puro” abaratando su precio, y viceversa, cuanto menor sea el número, “más puro” será el combustible (y más caro).

El combustible más utilizado en la industria del transporte marítimo es el aceite combustible intermedio (IFO) 180 e 380 (Marina, s. f.).

4.3 COMBUSTIBLES DESTILADOS

Los combustibles destilados provienen del refinamiento del petróleo, proceso en el cual se separan los destilados valiosos de los residuos e impurezas que pueda contener.

Existen una serie de fases a la hora de refinar el petróleo que se pueden resumir en las siguientes:

- Separación: Es la primera fase y tiene como objetivo desalar y deshidratar el crudo. Para ello se utiliza la destilación haciendo más sencilla la separación de sus moléculas al calentarse.
- Craqueo: Se utiliza una fuente de calor para elevar la temperatura del petróleo hasta su punto de ebullición con el objetivo de romper las grandes cadenas moleculares.
- Fraccionamiento: La temperatura se sigue aumentando en esta fase, de esta forma se consigue separar en las columnas de fraccionamiento los materiales más ligeros de los más pesados, quedando estos últimos en la parte inferior.
- Extracción: Una vez llegados a esta fase, dependiendo del producto que deseemos se extrae de la parte superior (para componentes ligeros) o de la inferior (para componentes más pesados) («Grupo Zoilo Ríos, Estaciones de Servicio» s. f.).

Los combustibles más usados dentro de este grupo en los buques mercantes son el gasoil marino (MGO) y el diésel marino (MDO) siendo este último menos ligero y de menor calidad, y como consecuencia más barato (Marina, s. f.).

El MGO se trata de un combustible refinado de bajo contenido de azufre, y es una excelente elección a usar en los motores diésel que operan bajo unas condiciones de altas exigencias.

Los aditivos con los que normalmente se comercializa le permiten fluir a bajas temperaturas sin obstruir los filtros de la línea, bombas de alimentación y el sistema de inyección; sin embargo, en lo que respecta al MDO cabe destacar que al ser de menor calidad

ACTUALES COMBUSTIBLES MARINOS

el precio es inferior al del MGO, siendo muchas veces esta característica la decisiva a la hora de elegir el combustible por parte del armador («retrieve.pdf» s. f.).

5. CONTROL DE EMISIONES Y SANCIONES

Hoy en día es fácil obtener información sobre los barcos mercantes a tiempo real, como su rumbo, combustible utilizado y datos básicos de cada buque. Gracias a esta monitorización del tráfico naval se puede, entre otras cosas, entender el presente y el futuro potencial que tienen estos buques respecto al impacto medioambiental que producen. Existen varios sistemas de control con el objetivo de proponer nuevas políticas ambientales o simplemente observar el cumplimiento de las actuales normativas, siendo el más usado el Sistema de Identificación Automática (AIS) debido a que ofrece mucha información sobre los movimientos de los buques, siendo una herramienta a bordo del buque para evitar colisiones con otros barcos. Tal es su importancia que la OMI obliga a los buques mayores de 300 GT que realicen viajes internacionales, buques de carga superiores a 500 GT y a todos los buques de pasaje a que dispongan de este sistema (*Regla 19 del Capítulo V del Convenio SOLAS*).

En la Figura 15 se muestra el tráfico en tiempo real ofrecido por el sistema AIS (tomado el día 09/04/2021 a las 17:00 horas) a lo largo de la costa asturiana.



Figura 12-tráfico marítimo sobre la costa Asturiana («Rastreo de buques AIS - VesselFinder» s. f.).

En lo que respecta al control de las emisiones producidas por los buques, es muy común el uso de UAS⁷ para medir los gases producidos por los buques en tiempo real, así como la utilización de aviones, helicópteros, satélites... para monitorizar la atmósfera desde grandes alturas («uas-drones-rpas-uav.pdf» s. f.).

⁷ UAS (Unmanned Aerial System) siglas referidas a los vehículos aéreos no tripulados (drones).

5.1 SANCIONES EN ZONAS ECA DE LA UNIÓN EUROPEA

El no cumplimiento de las normativas de emisiones por parte de los buques puede llegar a ocasionar sanciones económicas, e incluso penales en algunos casos. Dichas sanciones por el incumplimiento de la directiva 2012/33/UE no son iguales para todos los estados miembros de la Unión Europea, pudiéndose resumir en la *Tabla 9* las sanciones dependiendo del país

Además, si un buque ocasiona severos problemas, los estados miembros podrían solicitar la detención del mismo hasta que se solvete el problema (Marina, s. f.).

Tabla 2-Sanciones zonas ECA en la Unión Europea («BOE.es - BOE-A-2015-4218 Real Decreto 290/2015» s. f.)

País	Sanción máxima (€)	Tipo de sanción
Francia	200.000	Criminal
Bélgica	6.000.000	Criminal
Polonia	57.000	Administrativa
Inglaterra	3.450.000	Criminal
Lituania	14.500	Administrativa
Finlandia	800.000	Criminal
Alemania	25.000	Criminal
Suecia	10.000.000	Criminal
Noruega	300.000	Administrativa

5.2 SANCIONES EN ZONAS ECA DE CHINA

La Administración de Seguridad China (MSA) según el “*West P&I Club*” impone que una violación previa por parte de una empresa sobre las leyes de contaminación atmosférica impuestas por la OMI puede llegar a aumentar el importe de la gravedad hasta en un 30%, y si se realiza 2 o más incumplimientos por parte de la misma empresa, el importe podría ascender hasta un 70%.

En este caso, las sanciones del incumplimiento de las leyes de emisiones contaminantes están reguladas de tal forma que si una empresa la incumple por primera vez será sancionado con 2.500 US\$ / Día, mientras que, si es reiterativo, la cuantía aumenta hasta los 15.000 US\$ / Día («<https://www.france24.com/es/europa/20210322>» 2021).

Hoy en día es muy difícil que quede impune cualquier acción nociva contra el medio ambiente realizada por cualquier buque ya que, como se ha visto, la flota mundial está controlada a tiempo real, y con el endurecimiento de las normas anticontaminación reguladas por la OMI hace imperante la necesidad de reducir la contaminación producida por cada buque.

Como norma general el armador del buque no suele encontrarse a bordo del mismo mientras se realiza la campaña, con lo cual no está tan al día como los oficiales a bordo de todas las labores a realizar para conseguir reducir la contaminación que emite el buque, pudiendo incluso a optar por no realizar ningún cambio que le pueda suponer un gasto económico; y precisamente para estos casos se crearon las sanciones a los buques que no cumplan con la normativa explicado anteriormente.

Por estas razones la flota mundial está evolucionando hacia una era en donde la contaminación producida por los buques sea lo más baja posible, y para ello la sustitución del combustible residual pesado se ve como una solución necesaria debido a los altos contenidos de azufre del mismo.

6. BUQUE ESTUDIO TINERFE B/Q

En la Figura 13 se muestra el buque estudio de este trabajo: el “Tinerfe”, de la Distribuidora Marítima Petrogás, S.L.U.



Figura 13-Buque Tinerfe

Esta empresa es líder en el transporte de productos derivados del petróleo en el mercado canario. Principalmente la actividad del transporte y distribución se realiza en Canarias y en el norte de África para clientes como Cepsa y Disa (*Petrogas - Distribuidora Marítima, s. f.-b.*).

La empresa posee los siguientes certificados:

- ISO 9001, certificado de calidad.
- ISO 14001, certificado sobre protección ambiental.
- OHSAS 18001, certificado sobre seguridad y salud.

En la tabla 3 se muestra la flota y los productos que transporta actualmente esta empresa.

Tabla 3-Flota y capacidades de carga de cada buque («Petrogas - Distribuidora Marítima» s. f.)

Buque	Productos limpios	Productos sucios	Asfalto
Mencey	5.558	1.934	380
Guanarteme	2.985	1.266	-
Nivaria	4.251	-	-
Herbania	-	-	6.758
Tinerfe	18.611	-	-
Dácil	8.347	-	-
Herbania	-	300.000	6.758

6.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL BUQUE

El buque estudio tiene las siguientes dimensiones:

- 144 metros de eslora,
- 22 metros de manga, y
- 12,5 metros de puntal.

En cuanto al peso y capacidad de carga del mismo cuenta con:

- 11.290 toneladas de arqueado,
- 17.290 toneladas de peso muerto,
- 5.600 toneladas de desplazamiento en rosca, y
- 18.611 m³ (al 98% de llenado) de capacidad de carga, la mayor de toda la flota de la compañía.

Así mismo, cuenta con 16 tanques de lastre y 14 tanques de carga, distribuidos tal y como se puede observar en la Figura 14, y posee 14 bombas de carga de 300 m³ (uno para cada tanque) y 2 de 100 m³ de respeto.

Además, cuenta con numerosos equipos salvavidas y de lucha contraincendios, como lo son por ejemplo su bote de caída libre, 3 balsas, pescantes hidráulicos para arriar dichos botes, 2 extintores grandes (con ruedas de 135 y 45 litros), 18 mangueras de 45 milímetros de diámetro, 12 aros salvavidas, etc.

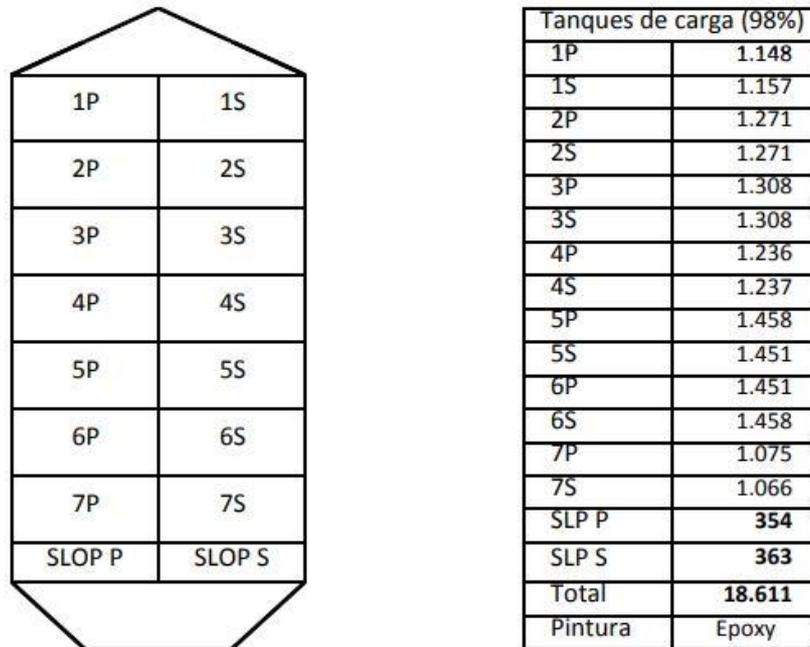


Figura 14-Disposición de los tanques de carga

6.2 MOTOR PRINCIPAL

El motor principal del buque es un MAN B&W modelo 8S35M (ver Figura 15), motor diésel lento de 2 tiempos que desarrolla una potencia de 8.080 caballos (5.920 kW) a 173 rpm, y acciona una hélice de paso fija, esto quiere decir que la velocidad del buque es directamente proporcional a la velocidad del giro del motor.

Carece de alternador de cola con lo cual para la producción de energía eléctrica el buque cuenta con 3 motores auxiliares que, a diferencia del principal, éstos son motores de 4 tiempos, marca YANMAR y desarrollan una potencia de 1.005 caballos (750 kW) a 900 rpm.

Durante la navegación y en estancias en puerto se mantiene activo 1 auxiliar, activando los otros 2 para la realización de maniobras debido al los altos consumos de energía producidos por la utilización de la hélice de proa (de accionamiento hidráulico y cuya potencia es de 500 kW).

Las características más importantes del motor principal proporcionadas por el manual del fabricante se recogen en la siguiente lista:

- Potencia y consumo:
 - Potencia máxima de 5.920 kW a 173 rpm.
 - Consumo específico de 178 g/kWh de IFO 380 + 5% de tolerancia.
 - Consumo diario de 19 toneladas.

- Disposición:
 - Cruceta⁸.
 - Motor de 2 tiempos.
 - Turbocargador de gases de escape.
 - 1 caldera de 1.400 kg/h de producción de vapor.

- Presiones:
 - 145 Bar (145×10^7 *Pascales*) de presión de combustión máxima.
 - 19,1 Bar (191×10^6 *Pascales*) de presión efectiva⁹.

⁸ La “cruceta” es un elemento de máquina que suprime o permite la componente no colineal del movimiento de una biela respecto a al movimiento del pistón solidario.

⁹La presión media efectiva representa el valor ficticio que debería tener la presión de los gases en el interior de un cilindro sin rozamiento para que desarrollase un trabajo equivalente al que se obtiene a la salida del cigüeñal en cuestión.

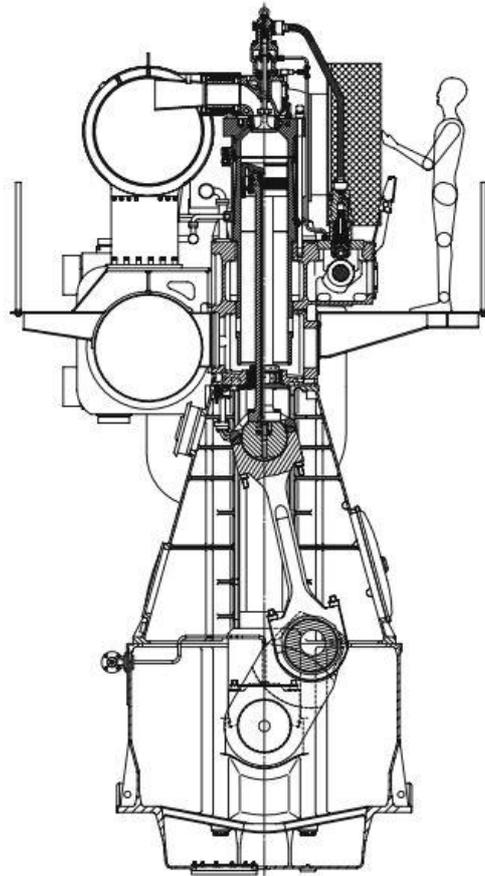


Figura 15-Sección transversal del motor principal

6.3 SISTEMA DE COMBUSTIBLE

El combustible utilizado era un IFO 380 con una viscosidad por debajo de 700 cSt a 50 °C en la Tabla 4 se muestran sus especificaciones.

Tabla 4- Características del IFO 380 («Inversionistas y Mercado - ENAP» s. f.)

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad a 15°C	991	Kg/m ³
Agua	0,5	% v/v
Aluminio + Silicio	80	ppm
Azufre	3,5	% m/m
Carbón Ramsbottom	18	% m/m
Cenizas	0,15	% m/m
Punto de Escurrimiento	30	°C
Punto de Inflamación	60	°C
Sedimento Total	0,1	% m/m
Vanadio	300	Ppm
Viscosidad a 50 °C	380	mm ² /s

Este fuel no se puede introducir en el motor directamente, debido entre otras causas, a que su alto contenido de impurezas podría ocasionar el colapso de la máquina, por lo que es necesario tratarlo para limpiarlo lo máximo posible antes de su uso para evitar posibles daños al sistema de combustible de la máquina.

La forma que se tiene a bordo para purificar estas impurezas es mediante el sistema de depuradoras centrífugas, que permite separar tanto el agua como sustancias abrasivas del fuel. Una vez pase el fuel por las depuradoras y esté “limpio”, con el objetivo de obtener una correcta atomización a la hora de la inyección, se debe realizar un precalentamiento previo a la inyección, ya que una temperatura inadecuada a la hora de la inyección podría producir una combustión incorrecta, originando un mayor desgaste de los cilindros, en los asientos de las

válvulas de escape, pudiendo producir altas presiones de inyección que originarían altas tensiones mecánicas en el sistema de combustible.

A bordo del buque, este precalentamiento se realiza mediante el vapor producido en la caldera, y la viscosidad resultante se mide mediante un regulador de viscosidad (viscosímetro) que controla el suministro de vapor.

Dependiendo de la relación entre el índice de viscosidad del fuel y temperatura, la salida del combustible del precalentador podría llegar hasta los 150 °C. con fueles pesados, manteniéndonos entre los 90°C y 100°C de temperatura utilizando el IFO 380.

La viscosidad del fuel tras pasar por todos los procesos de limpieza y precalentamiento debe estar comprendida entre 10 y 15 cSt. según indica el fabricante.

7. CAMBIO DE COMBUSTIBLE

La utilización del diésel como sustitutivo del fuel es una alternativa para cumplir con la legislación medioambiental que afecta a los altos contenidos de azufre de los combustibles.

En este capítulo se describen los pasos y modificaciones que se deben realizar en la máquina del buque de estudio para cambiar el consumo del motor principal de HFO a DO.

7.1 PASOS A REALIZAR PARA EL CAMBIO DE COMBUSTIBLE

El motor principal sin realizar ninguna modificación puede admitir el uso de combustible diésel en vez de fuel, pero solo durante periodos puntuales de tiempo.

7.1.1. CAMBIO DE FUEL A DIESEL DURANTE UNA PARADA

- Parar el precalentamiento para bajar la temperatura.
- Cambiar la posición de las válvulas de suministro de los tanques, de tal forma que el diésel comunique con las bombas de alimentación.
- Arrancar las bombas de alimentación y circulación.
- Una vez que el fuel es reemplazado por el diésel, cambiar la válvula de venteo de nuevo a su posición inicial.
- Parar las bombas de alimentación y circulación.

7.1.2. CAMBIO DE FUEL A DIESEL DURANTE UNA NAVEGACIÓN

- Precalentar el diésel hasta una temperatura de 50 °C.
- Cortar el suministro de vapor al calentador de fuel.
- Reducir la velocidad hasta $\frac{3}{4}$ de la velocidad de servicio.
- Cambiar a diésel cuando la temperatura del fuel haya bajado hasta tener aproximadamente 25 °C por encima de la del diésel, pero nunca hacer el cambio a una temperatura superior a 75 °C.

Para proteger el sistema de inyección contra cambios rápidos de temperatura, los cuales pueden causar daños, el cambio de combustible se debe realizar con los pasos

previamente descritos. El fabricante recalca la importancia respetar las temperaturas y no acortar los tiempos de demora para evitar fallos al motor.

7.2 PRUEBA EN NAVEGACIÓN

Con el objetivo de conseguir información acerca del comportamiento que tendría el buque durante una navegación al cambiarle el combustible de la planta, se decide realizar el día 14 de noviembre del 2020 el cambio de combustible durante la estancia en el puerto de Palma de Mallorca, y observar el comportamiento del motor durante la navegación hasta el puerto de Ibiza (alrededor de 65 millas náuticas¹⁰ de distancia entre ambos puertos).

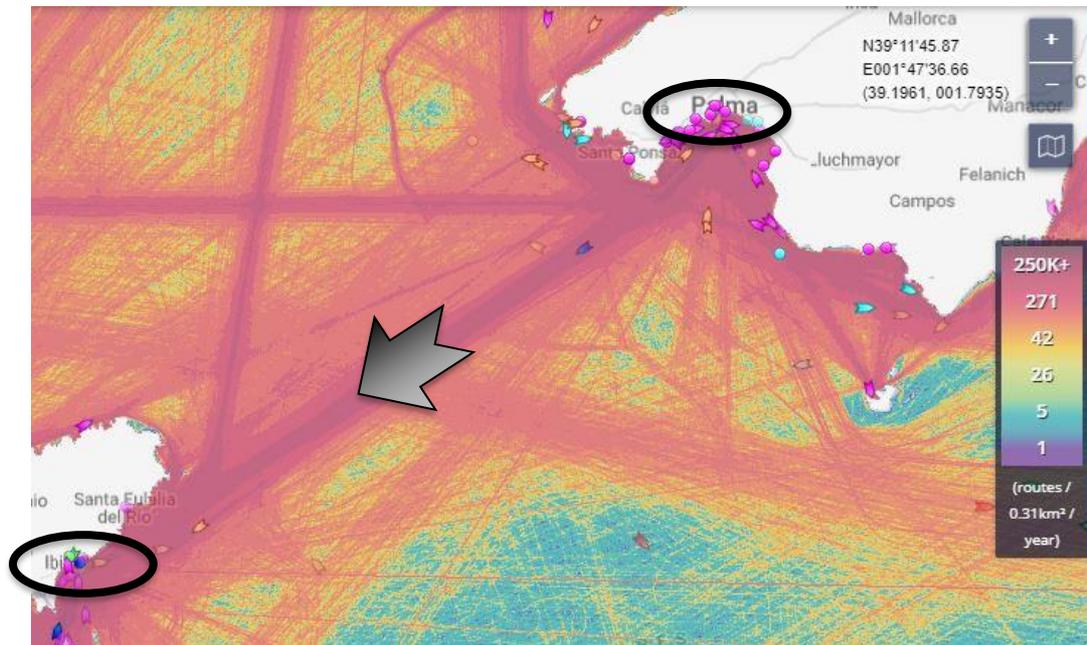


Figura 16-Navegación entre Palma e Ibiza («MarineTraffic: Global Ship Tracking Intelligence / AIS Marine Traffic» s. f.)

Una vez realizado el cambiado de combustible, se comienza con la toma de datos.

Las temperaturas se obtuvieron mediante una cámara termográfica (Fluke TiS60, ver Figura 17) disponible a bordo del buque para la realización de labores diarias.

¹⁰ Una milla náutica corresponde a 1.852 metros, a diferencia de la milla terrestre que equivale a 1.609 metros.



Figura 17-Cámara termográfica fluke TiS60 («<https://es.rs-online.com/>» s. f.).

En la Figura 18 se muestra una de las termografías tomada para observar la temperatura del combustible circulante por el interior de la bomba de inyección N°1 del motor principal.

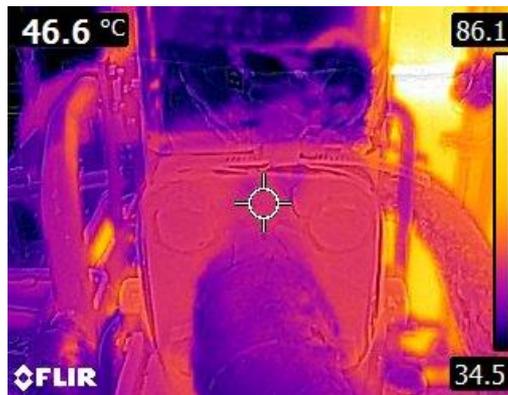


Figura 18-Termografía de la bomba de inyección N°1.

En las siguientes tablas se muestran los resultados obtenidos a 146 rpm del motor principal trascurridos 15 minutos del cambio de combustible

CAMBIO DE COMBUSTIBLE

Tabla 5-Temperaturas obtenidas en las pruebas

Punto de muestra	Temperatura (°C)
Entrada de combustible al M.P. <i>Motor Principal</i>	44
Retorno de combustible del M.P	51,4
Entrada de combustible al MM.AA. <i>Motores Auxiliares</i>	48,7
Retorno del combustible del MM.AA.	47,9
Bomba de inyección N.º 1	46,6
Bomba de inyección N.º 2	47,2
Bomba de inyección N.º 3	47
Bomba de inyección N.º 4	43,2
Bomba de inyección N.º 5	47,3
Bomba de inyección N.º 6	47,3
Bomba de inyección N.º 7	46,5
Bomba de inyección N.º 8	45,9
Entrada de vapor al condensador de purgas	103
Salida del agua del condensador de purgas	87,3
Tanque de cascada	54,8

7.3 CONCLUSIONES DE LA PRUEBA

Tras analizar los datos obtenidos en la prueba de navegación, se pueden sacar las siguientes conclusiones:

➤ **Sistema de combustible.**

- Según la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D6450 la temperatura de inflamación del diésel es de 60 °C, y tanto las temperaturas de entrada y salida de combustible del motor principal están por debajo de dicha temperatura, aunque con un margen que se podría ampliar.

➤ **Sistema de vapor.**

- Durante la prueba de navegación no se ha detectado ningún exceso de temperatura en el enfriador ni en el tanque de cascada, y teniendo en cuenta que el enfriador tiene muchos tubos de refrigeración sacrificados por desgaste, el resultado se considera más que satisfactorio.

➤ **Problemas con el uso del MDO en el motor principal.**

- No todos los resultados de la prueba han sido satisfactorios, a continuación, se muestran los puntos más relevantes que dieron problemas durante la prueba de navegación:
 - En la maniobra de llegada a Ibiza se tuvo que realizar la maniobra en modo local (modo de emergencia, el cual permite controlar el motor principal desde el propio motor y no desde el control de máquina), puesto que el regulador del aire de arranque no respondía correctamente y el motor no arrancaba. Se hacen necesario utilizar más aire para las arrancadas iniciales, con el consiguiente desgaste de los compresores de aire
 - Durante la salida de Palma, una vez arrancado el motor, éste demora excesivamente el tiempo en subir de 100 rpm a 150 rpm (velocidad de servicio del buque).
 - No se consiguió alcanzar la velocidad de servicio (150 rpm) durante la navegación, quedándose la velocidad máxima fluctuando entre las 145,5 rpm y 14,7 rpm.

7.4 NECESIDAD DE LA INSTALACIÓN DE UN ENFRIADOR

Durante la prueba, la temperatura de salida del combustible del motor principal fue entorno a los 52 °C, eso son solo 8 °C por debajo de su punto de inflamación. Teniendo en cuenta que la prueba se realizó a mediados de noviembre, fecha en la cual las temperaturas en la sala de máquinas son considerablemente más livianas que durante el verano, y aunque los resultados de la prueba hayan mostrado que tanto la temperatura de entrada como la de salida del diésel del motor principal estuvieron por debajo de la temperatura de inflamación del combustible, se hace necesario la instalación de un enfriador de combustible para poder evitar posibles subidas de temperatura.

Se barajan varias posibilidades para la instalación del enfriador y finalmente se decanta por ubicar el enfriador en el interior del local de las purificadoras. (ver *Figura 25* y *Figura 26*).

Éste local se encuentra rodeado por los tanques de combustible de HFO, alcanzando una temperatura de entre 40 y 50 °C durante todo el año, aunque teniendo en cuenta el cambio a MDO las temperaturas de los tanques de almacén de combustible bajarían dejando la temperatura ambiente entorno a los 25 – 30 °C, temperatura a la cual el enfriador puede trabajar de forma correcta.

La mesa de trabajo que se observa en la imagen (de color amarillo) tiene un tamaño de 700 mm de alto, 500 mm de ancho y 750 mm de profundidad; se utiliza como mesa de trabajo para realizar las labores de mantenimiento a las depuradoras.

Para realizar la instalación del enfriador se propone trasladar la mesa de trabajo fuera del local de depuradoras, y reemplazarlo por el enfriador, puesto que sería un lugar estratégico para realizar las uniones necesarias en las líneas de combustible que irán al enfriador optimizando así el espacio.



Figura 19-Local de purificadoras



Figura 20-Local de purificadoras (2)

Con respecto a la refrigeración que utilizaría el enfriador, se barajó la posibilidad de utilizar agua salada como líquido refrigerante, aunque rápidamente se descartó esta opción puesto que, en caso de fallo en el enfriador se produciría una mezcla de ambos líquidos, produciéndose una contaminación, además el uso de agua salada como medio refrigerante también tiene el inconveniente de que requiere más horas de mantenimiento del enfriador.

CAMBIO DE COMBUSTIBLE

Una vez descartada esta opción, se considera que la mejor opción resulta de realizar 2 uniones en la línea del sistema de refrigeración de agua de baja del motor principal, de tal forma que se optimice lo máximo posible el espacio disponible.

El buque tiene instalado 2 enfriadores de agua de baja refrigerados por agua de mar (ver Figura 21), los cuales en condiciones operativas normales tienen un margen de trabajo suficiente como para poder asumir este nuevo consumidor (el nuevo enfriador de combustible) ya que, en condiciones nominales, la temperatura del agua de refrigeración de baja está entorno a los 32 °C, y esta última campaña de verano se alcanzó temperaturas superiores a los 27 °C en el agua de mar y la temperatura de refrigeración de baja no aumentó de los 35 °C, lo que ratifica el correcto funcionamiento de estos enfriadores.

Aun así y en caso de necesidad, estos enfriadores de baja pueden aumentar su capacidad añadiendo más placas, lo cual proporcionaría una superficie mayor de intercambio térmico, aumentando el rendimiento de estos.



Figura 21-Enfriador de agua de baja

En la Tabla 6 se muestran las especificaciones técnicas del intercambiador de calor elegido para la refrigeración del nuevo combustible.

Tabla 6- Características técnicas del enfriador de MDO

Parámetro	MDO		AGUA	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Caudal (m ³ /h)	5,4	5,4	10,8	10,8
Temperatura (°C)	55	40	36	39

Una vez instalado el enfriador de MDO en el local de depuradoras, es necesario realizar las modificaciones mostradas en la Figura 22 en el sistema de combustible.

El combustible comienza su recorrido en los tanques de almacén, desde los cuales sale hacia las bombas de alimentación, y una vez allí, el combustible pasa por un contador, cuya misión es contabilizar la cantidad de combustible que pasa por la línea para posteriormente poder tener un control del consumo de la máquina.

A continuación, es aspirado por la bomba de circulación y, justo después, se realiza la modificación, donde se realizan 2 pinchazos en la línea, el punto A que desvía el combustible hacia el enfriador (ver Figura 22) y posteriormente regresa por el punto B hacia el circuito nuevamente.

Ya con el combustible refrigerado, éste se le hace pasar directamente a los filtros automáticos para posteriormente, tras pasar por otro contador, entrar en el motor principal, evitándose el paso por los precalentadores (ya que el combustible diésel no necesita precalentarse como si hacía falta con el fuel).

En este punto, el circuito de combustible se divide en 2, uno que entra directamente hacia el motor principal, y otro que se dirige hacia los 3 motores auxiliares.

Este primer flujo se encarga de hacerle llegar el combustible al motor principal, el cual, tras realizar su consumo, envía el exceso de combustible por la línea de retorno que llega directamente hasta el “Desaireador” (venting box), cuya misión es redirigir el combustible

CAMBIO DE COMBUSTIBLE

sobrante de nuevo hacia los tanques almacén, o en su defecto, enviarlo directamente hacia las bombas de circulación.

Los motores auxiliares son alimentados por la otra línea previamente mencionada, en la cual el combustible pasa nuevamente por un filtro y otros 2 contadores. Al igual que pasa con el motor principal, tras consumir el combustible en los auxiliares, éstos tienen su línea de retorno que envía el exceso de combustible hacia el “Desaireador”, cerrándose de esta forma el circuito de combustible.

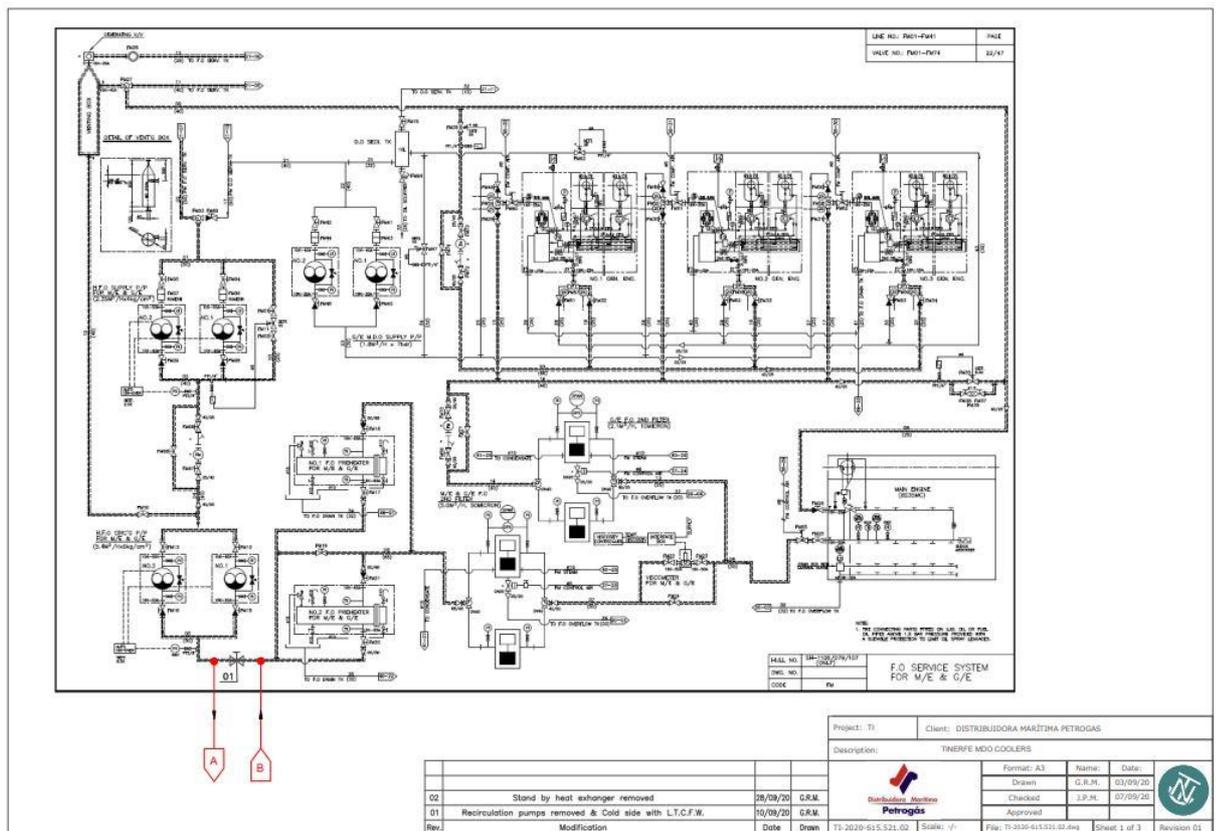


Figura 22-Plano del Sistema de Combustible (modificación)

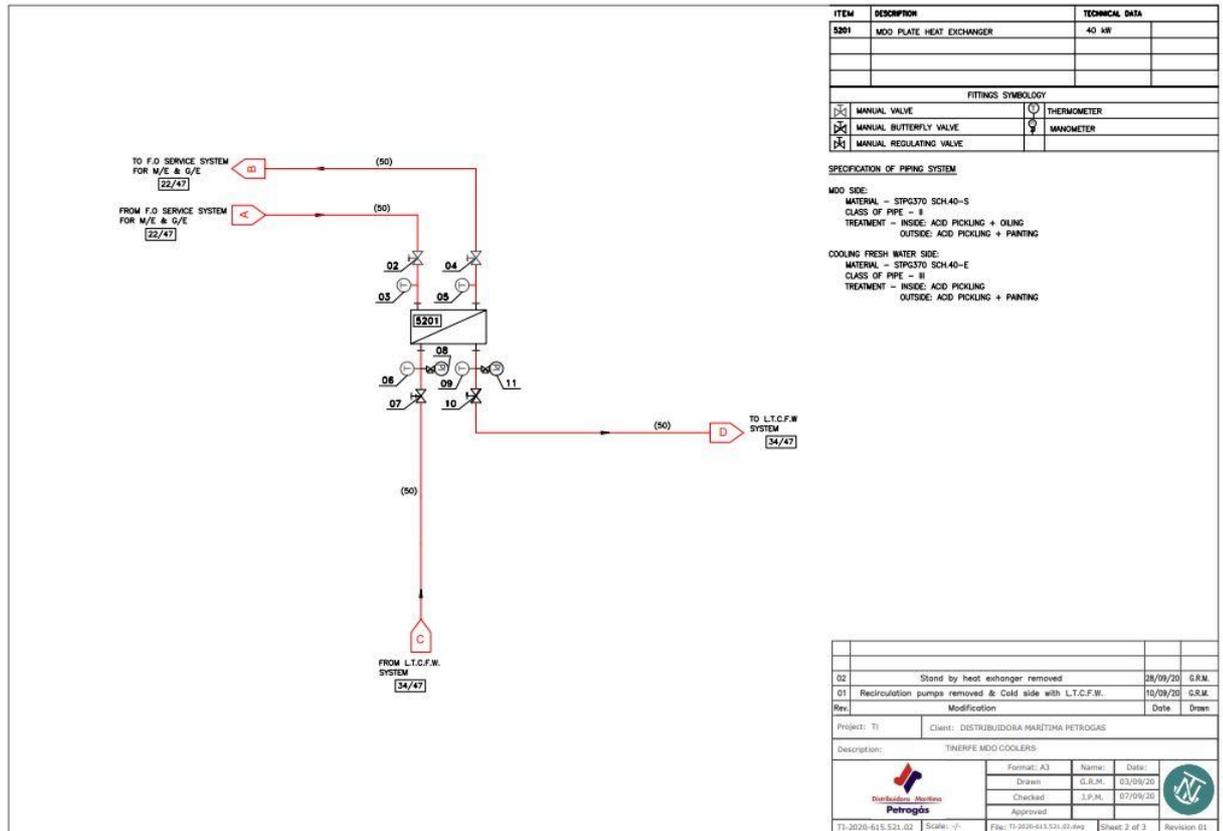


Figura 23-Plano de las líneas de instalación del enfriador de MDO

Las modificaciones a realizar en el sistema de refrigeración de agua de baja temperatura (ver Figura 24) son similares a las del circuito de combustible.

En este caso el agua de refrigeración comienza su circuito en el tanque de expansión de baja, el cual tiene la misión de recoger el agua procedente de las diferentes líneas de la máquina tras realizar el circuito de refrigeración completo, que se acumulan todas en el tanque para realizar nuevamente este circuito.

El agua sale del tanque y llega hasta los enfriadores de baja por gravedad, puesto que por diferencia de alturas entre ambos se hace posible evitar el uso de bombas en este tramo de líneas.

Una vez el agua sale de los enfriadores, esta llega hasta las bombas de circulación, tras las cuales hay una RTD (sensor de temperatura resistivo) que controla la temperatura de refrigeración, haciendo recircular el agua en los enfriadores hasta llegar a su temperatura correcta. Una vez alcance la temperatura de servicio, ésta sigue las líneas hacia los diferentes consumidores que requieran su servicio.

CAMBIO DE COMBUSTIBLE

En el plano (Figura 24) se puede observar los puntos de unión C y D en las líneas que se propone por razones logísticas para optimizar el espacio disponible en la sala de máquinas y evitar excesivas modificaciones.

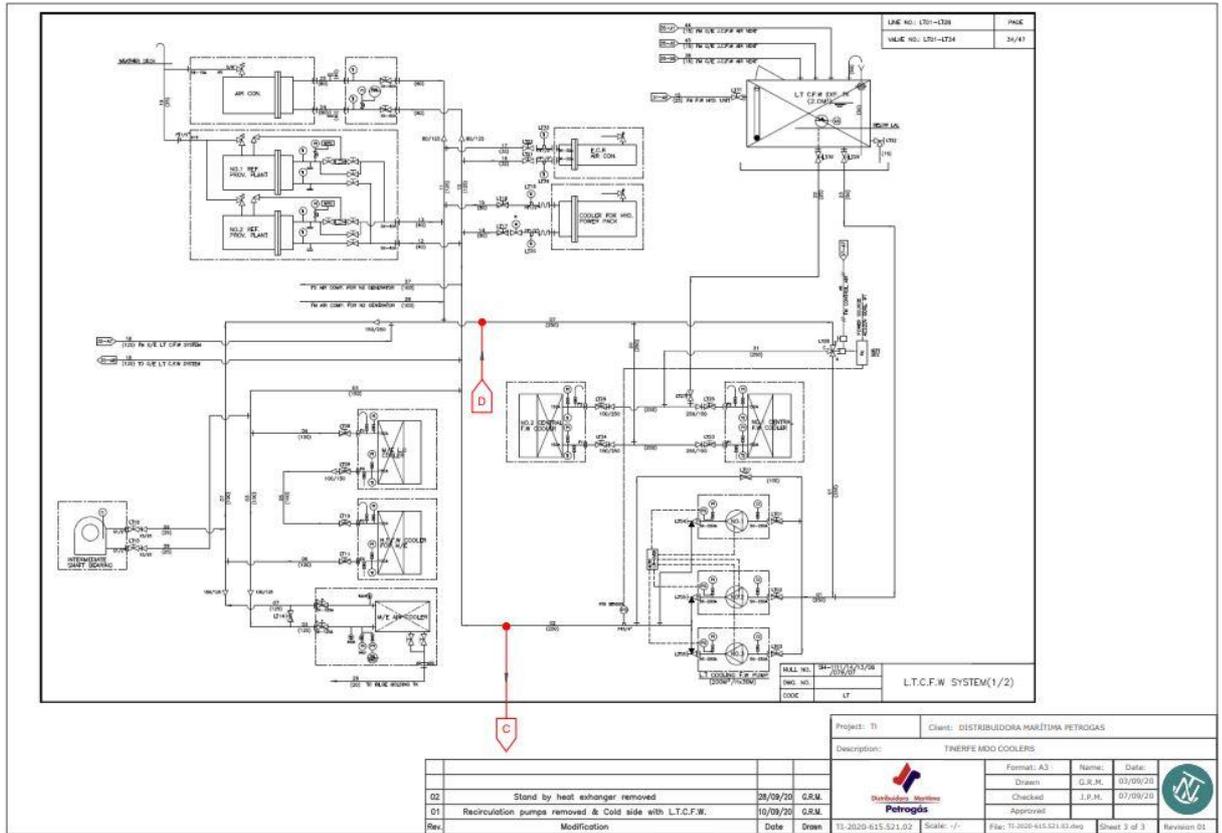


Figura 24--Plano del agua de refrigeración de baja (Modificación)

7.5 POSIBLE EXCESO DE VAPOR

Otro de los problemas que se plantea en la modificación del buque para el consumo de MDO es la posibilidad de tener un exceso de vapor producido por la caldera, ya que los consumidores de vapor se verían altamente reducidos.

Durante la estancia en puerto, los consumidores de vapor del buque son todos los relacionados con el HFO:

- Calefacción de tanques de combustible.
- Líneas de combustible del motor principal.
- Purificadoras.
- Precalentadores.
- Etc.

Se podría evitar este problema si durante la estancia en puerto se decide parar la caldera, evitando de esta forma la producción de vapor innecesaria debido a la eliminación de prácticamente todos los consumidores de vapor del buque. Pero esta idea queda totalmente descartada debido a que la necesidad de mantener el sistema de la caldera activo es esencial en el buque, puesto que, entre otros motivos, se necesita tener disponibilidad de realizar una limpieza de tanques de carga con agua caliente.

Además, el sistema de refrigeración de agua de alta temperatura, que funciona como sistema de calefacción para el motor principal, ha de mantenerse constante (entorno a los 80 °C) durante todo el periodo que el buque esté parado, y la instalación de un calentador eléctrico para cubrir esta necesidad queda descartada tras valorar su compleja instalación en la máquina.

Durante la navegación, en condiciones normales (trabajando con HFO) el economizador resultaba más que suficiente para satisfacer las necesidades de los consumidores de vapor, pero al cambiar el tipo de combustible los consumidores de vapor se reducen considerablemente (igual que ocurre durante la estancia en puerto).

Según el fabricante, la caldera auxiliar “*Miura*” produce 15.000 kg / h de vapor siempre y cuando se den estas 2 condiciones:

- Funcione con HFO.

CAMBIO DE COMBUSTIBLE

- La atomización sea con vapor.

Para reducir la cantidad de vapor producido por la caldera, se cambia el modo de operación para que funcione en modo “*Low Combustion*” y la atomización, para que sea por aire y no por vapor (Figuras 25 y 26). De esta forma se consigue reducir la producción de vapor hasta un 20% de su producción nominal.

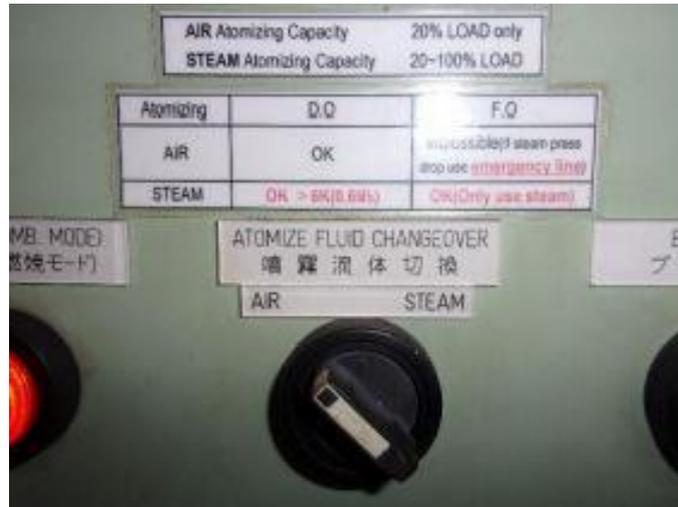


Figura 25-Caldera "Miura": modo de atomización



Figura 26-Caldera "Miura": modo de combustión

$$15.000 \text{ kg/h} \times 0,2 \cong 3.000 \text{ kg/h}$$

Realizando estos cambios en la caldera conseguimos reducir considerablemente la producción de vapor, pasando a producir solo sobre 3.000 kg/h de vapor. En lo que respecta

Tabla 7- Características técnicas del condensador de purgas

	VAPOR	CONDENSADO
Parámetro		
Caudal (m ³ /h)	3.300	10.000
Temperatura de entrada (°C)	110	-
Temperatura de salida (°C)	70	-

Tras la realización de la prueba en navegación con el cambio de combustible, se observa lo siguiente con respecto al sistema de vapor:

- La temperatura de entrada de los retornos de vapor es de 103 °C, claramente por debajo de los 110 °C que admite como tope el condensador de purgas.
- La temperatura de salida del condensado es de 87,3 °C, temperatura también admisible según indica el manual del fabricante.
- La temperatura del tanque de cascada es de 54,8 °C, que comparándola con su valor mientras se usaba HFO como combustible principal, no ha variado prácticamente nada.

Teniendo en cuenta que el actual estado del condensador de purgas es bastante mejorable, ya que aproximadamente un 40% de tubos de refrigeración están sacrificados debido a causas diversas, los resultados de la prueba son muy satisfactorios.

Una vez el buque navegue a MDO la reducción de potencia de la caldera no supondrá ningún problema de déficit de vapor en ningún sistema a bordo, ya que, al reducirse notablemente los consumidores de vapor, no se hace necesaria la producción de vapor a un caudal igual a que si el buque funcionase con HFO.

El sistema de condensado actual funciona de forma correcta durante la prueba realizada, y teniendo en cuenta el estado del condensador de purgas, se puede llegar a la conclusión de que no se hace necesaria realizar ningún cambio notorio en el sistema de vapor del buque, exclusivamente el cambio / reparación del condensador de purgas actual, para asegurarse una eficacia del 100% y un correcto funcionamiento de sistema.

8. CONCLUSIONES

Con la llegada de las nuevas normativas de contaminación impuestas por la OMI que obligan a los buques a bajar su contenido de azufre en los gases que emiten, se hace imperante la necesidad de realizar cambios a bordo de estos.

Una vez explicada la propuesta del cambio de combustible del buque “Tinerfe” de la compañía marítima “Petrogás” se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- **Sistema de combustible.**
 - Para evitar el exceso de temperatura al realizar el cambio de combustible se propone la instalación del enfriador de MDO.

- **Sistema de vapor.**
 - Durante la prueba en navegación se pudo observar como el sistema actual de condensado del vapor funciona correctamente aún con el hándicap de su estado actual, con lo que se llega a la conclusión de que no es necesaria la modificación del sistema, únicamente se propone el cambio del condensador de purgas debido a su estado actual, para que funcione al 100%.

- **Motor principal.**
 - Durante la prueba en navegación se detectaron problemas en el periodo de arranque del motor, debido al regulador, ya que éste venía preparado para trabajar con las características del combustible HFO y no con las del MDO, siendo esta diferencia en las características entre ambos combustibles la causante de los problemas
 - Durante la navegación no se consiguió alcanzar la velocidad de servicio del buque y éste demoró excesivamente el tiempo de rampa de subida de velocidad.
 - Se propone la puesta en contacto con el fabricante MAN B&W para modificar los parámetros necesarios para solventar estos problemas. (aumento de presión de los inyectores, aumento de la cremallera en las bombas de inyección, cambio del regulador...).

BIBLIOGRAFÍA

- «anexo V Directiva 1999/30/CE». s. f. Accedido 22 de marzo de 2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32001D0744&from=ES>.
- «BOE.es - BOE-A-2015-4218 Real Decreto 290/2015». s. f. Accedido 13 de abril de 2021. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2015-4218>.
- «cadena de suministro Maersk». 2014. Cadena de Suministro. 1 de agosto de 2014. <https://www.cadenadesuministro.es/noticias/maersk-incrementara-el-precio-del-contenedor-para-compensar-los-costes-del-nuevo-combustible-bajo-en-azufre/>.
- «Charles Henri Dupuy de Lôme». 2020. En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Charles_Henri_Dupuy_de_L%C3%B4me&oldid=131166676.
- «Combustible». 2021. En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Combustible&oldid=134444406>.
- «CONCAWE.Eu». s. f. *Concawe* (blog). Accedido 19 de marzo de 2021. <https://www.concawe.eu/topics/petroleum-products/>.
- «Concepción M. A. Pérez Hernández». s. f. Accedido 23 de marzo de 2021. <https://www.redalyc.org/pdf/755/75506806.pdf>.
- «Denis Papin». s. f. Accedido 14 de marzo de 2021. <http://automata.cps.unizar.es/Biografias/Papin.htm#:~:text=All%C3%AD%2C%20Pap in%20reprodujo%20el%20experimento,primera%20m%C3%A1 quina%20atmosf%C3%A9rica%20de%20vapor>.
- elblogverde.com. 2019. «Combustibles Fósiles - Características, Origen, Aplicaciones y Efectos Secundarios». *EI Blog Verde.Com* (blog). 23 de mayo de 2019. <https://elblogverde.com/los-combustibles-fosiles/>.
- «EspacioCoches.com». s. f. Accedido 4 de abril de 2021. <https://espaciocoches.com/motor-de-explosion-de-4-tiempos/>.
- «first steam ship». s. f. Terránea. Accedido 14 de marzo de 2021. <https://blog.terranea.es/primer-barco-de-vapor-historia/>.
- «Fuelóleo pesado (HFO) | Glosario | Oiltanking». s. f. Accedido 19 de marzo de 2021. <https://www.oiltanking.com/es/publicaciones/glosario/detalles/term/fueloleo-pesado-hfo.html>.
- «Grupo Zoilo Ríos, Estaciones de Servicio». s. f. Accedido 6 de abril de 2021. <https://www.zoilorios.com/noticias/proceso-de-refinamiento-del-petroleo-como-es>.
- Henry Crew. 1940. «The Tragedy of Rudolf Diesel». *The Scientific Monthly* 51 (6): 512-23.
- «<https://es.rs-online.com/>». s. f. Accedido 30 de abril de 2021. [https://es.rs-online.com/web/p/camaras-termograficas/1981145/?cm_mmc=ES-PLA-DS3A-_-google-_-PLA_ES_ES_Prueba_y_Medida_Whoop-_- \(ES:Whoop!\)+C%C3%A1maras+Termogr%C3%A1ficas-_-1981145&matchtype=&pla-310395557989&gclid=Cj0KCQjw1a6EBhC0ARIsAOiTKrGWYFRtHBeKlPnCC4eT3-JVcWkdvZfN3qp6uCvTrMt8RHxQVa7nq0EaAuPrEALw_wcB&gclid=aw.ds](https://es.rs-online.com/web/p/camaras-termograficas/1981145/?cm_mmc=ES-PLA-DS3A-_-google-_-PLA_ES_ES_Prueba_y_Medida_Whoop-_- (ES:Whoop!)+C%C3%A1maras+Termogr%C3%A1ficas-_-1981145&matchtype=&pla-310395557989&gclid=Cj0KCQjw1a6EBhC0ARIsAOiTKrGWYFRtHBeKlPnCC4eT3-JVcWkdvZfN3qp6uCvTrMt8RHxQVa7nq0EaAuPrEALw_wcB&gclid=aw.ds).
- «<https://www.diariomotor.com>». s. f. article. Accedido 21 de mayo de 2021. <https://www.diariomotor.com/que-es/mecanica/distribucion-variable/>.

- «<https://www.france24.com/es/europa/20210322>». 2021. France 24. 22 de marzo de 2021. <https://www.france24.com/es/europa/20210322-union-europea-sanciones-china-uigures-myanmar>.
- «Inversionistas y Mercado - ENAP». s. f. Accedido 26 de mayo de 2021. https://www.enap.cl/pag/119/1304/petroleo_uso_marino_ifo_380.
- Jonathan Eduardo González Gil. 2018. «Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna». *Revista UIS Ingenierías 17* (1): 143-54. <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018013>.
- José Adrián Rodríguez Ponce, José Adrián Rodríguez. s. f. «SISTEMAS DE PROPULSIÓN Y CLASIFICACIÓN DE BUQUES.», 63.
- «Luis Puig Roca (Escuela Náutica Barcelona)». s. f. Accedido 12 de marzo de 2021. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/131329/evolucion.pdf?sequence=1>.
- Marina, Ingeniería. s. f. «QUE LLEVA POR TÍTULO», 123.
- «MarineTraffic: Global Ship Tracking Intelligence | AIS Marine Traffic». s. f. Accedido 29 de abril de 2021. <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:1.8/centery:39.2/zoom:9>.
- «Napoléon (1852)». s. f. En *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Accedido 15 de marzo de 2021. [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Napol%C3%A9on_\(1852\)&oldid=132301632](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Napol%C3%A9on_(1852)&oldid=132301632).
- «Organización Marítima Internacional (OMI)». s. f. Accedido 21 de febrero de 2021. <https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Paginas/Sulphur-2020.aspx>.
- «Página principal de la Junta de Castilla y León». s. f. Text. Junta de Castilla y León. Castilla y León. Accedido 26 de febrero de 2021. https://www.jcyl.es/web/jcyl/Portada/es/Home/1246890364336/_/_/_.
- «Petrogas - Distribuidora Marítima». s. f. Accedido 12 de febrero de 2021a. <http://www.petrogas.es/flota/Tinerfe.aspx>.
- «———». s. f. Accedido 15 de abril de 2021b. <http://www.petrogas.es/Default.aspx>.
- «Petroleum Products». s. f. *Concawe* (blog). Accedido 21 de marzo de 2021. <https://www.concawe.eu/topics/petroleum-products/>.
- «Rastreo de buques AIS - VesselFinder». s. f. Accedido 9 de abril de 2021. <https://www.vesselfinder.com/es>.
- «retrieve.pdf». s. f. Accedido 6 de abril de 2021. <https://repositorio.comillas.edu/rest/bitstreams/144309/retrieve>.
- «Revista de Obras Públicas nº 3.537. Noviembre 2012». s. f. Accedido 19 de febrero de 2021. http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/2012/2012_noviembre_3537_05.pdf.
- «Technical Courses :: Cursos Técnicos». s. f. Accedido 4 de abril de 2021. http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_categorias.php?categoria_id=7&nombre=Maquinaria.
- «tribuna_bia0520.pdf». s. f. Accedido 24 de mayo de 2021. https://www.anave.es/images/tribuna_profesional/2020/tribuna_bia0520.pdf.
- «uas-drones-rpas-uav.pdf». s. f. Accedido 9 de abril de 2021. <https://www.windtarifa.com/uas/contaminacion-atmosfera-gases-invernadero-buques-mercantes-uas-drones-rpas-uav.pdf>.
- «World Health Organization». s. f. Accedido 19 de febrero de 2021. <https://www.who.int/whr/2002/chapter4/en/index7.html>.

BIBLIOGRAFÍA

«Zonas ECA». s. f. Accedido 11 de febrero de 2021.
<http://ingmaritima.blogspot.com/2017/06/zonas-eca.html>.