



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de modificación de motor marino diésel
para operación con gas*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Iván Mosquera Hoyos

DIRECTORES: Miguel Ángel Álvarez Feijoo
Guillermo David Rey González

CURSO ACADÉMICO: 2017-2018

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de modificación de motor marino diésel
para operación con gas*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

En el presente Trabajo Fin de Grado se estudia la conversión de un motor de combustión interna diésel a gas. Esta tecnología, denominada dual fuel, reduce los costes de operación, alarga la vida útil de los motores y resulta más respetuosa con el medio ambiente que los actuales motores diésel.

Se analiza la viabilidad de la modificación, entendida como viabilidad técnica, económica y financiera, de los sistemas que pueden trabajar con dos combustibles. Se proyecta la implantación de este sistema combinado a bordo de dos plataformas navales diferentes, el patrullero P-28 “Tabarca” y las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar.

De este proyecto se concluye que la instalación del sistema dual fuel sobre las lanchas de instrucción es factible y rentable. No ocurre lo mismo con el patrullero “Tabarca” sobre el que se descarta la modificación, debido a que el elevado coste de compatibilizar el dual fuel, no parece, a la luz de las previsiones actuales, rentable en la vida útil restante.

PALABRAS CLAVE

Dual fuel, gas natural, gas licuado de petróleo, diésel, conversión

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por siempre estar siempre tratando de apoyarme en cualquiera de los proyectos en que me embarco, toda mi vida.

A mi padre, quien ha inculcado en mí esta pasión por cualquier cosa que hago en la vida. Él ha sido el quien me inculcó este gusto por la mecánica.

A mi madre, quien me ha apoyado siempre en cualquiera de mis propósitos. Ella ha inculcado en mí la perseverancia y la ilusión de las que ella misma se caracteriza.

A mi hermano, quien siempre me ofreció su ayuda de manera incondicional, así como su alegría y sonrisas características. Siempre ha estado ahí para, aunque parezca poco, escucharme.

A María José, quien gracias a su paciencia y su apoyo, además de perseverancia, ha aportado a este trabajo y a mi crecimiento personal mucho más de lo que a priori pueda parecer.

A mi abuelo y mi abuela, quienes desde el primer momento me alentaron a escoger la carrera que sigo ahora mismo y que con tanto orgullo me animan a seguir.

A mis tutores, D. Miguel Ángel Álvarez Feijoo y D. Guillermo David Rey González por el tiempo que han invertido, tanto en mi formación, como en este proyecto.

A Susocar, en especial a Suso, quien dedicó parte de su tiempo en guiarme en mi visita a sus instalaciones y explicarme como hace su trabajo en este tipo de conversiones.

CONTENIDO.

Contenido.	1
Índice de Figuras.	3
Índice de Tablas.....	5
Glosario de términos.	7
1 Introducción y contextualización.	9
1.1 Objetivos y planteamiento.	10
2 Estado del arte.	11
2.1 Motores de combustión interna alternativos.	11
2.2 Clasificación de los motores de combustión interna alternativos.	12
2.2.1 Motores de encendido provocado.	12
2.2.2 Motores de encendido por compresión.	12
2.2.3 Motores de cuatro tiempos.....	13
2.2.4 Motores de dos tiempos.	15
2.3 El motor diésel.	16
2.3.1 Historia del motor diésel.....	16
2.3.2 Ciclo teórico de los motores diésel.	17
2.4 Normativa y emisiones.....	18
2.4.1 Normas sobre contaminación en la mar.....	18
2.4.1 Acuerdos en materia de contaminación y huella ecológica.....	20
2.4.2 RSC de las Fuerzas Armadas.....	23
2.5 Gas-diésel dual fuel.....	24
2.6 Tipos de motores dual fuel.....	25
2.6.1 Pre-mezcla de gases.	25
2.6.2 Inyección directa.....	29
2.7 Variaciones del motor dual fuel.	29
2.8 Combustibles y su almacenamiento.	30
2.8.1 Gas Natural.	30
2.8.2 Gas Licuado de Petróleo.	34
2.9 Normativa y emisiones.....	35
2.9.1 Acuerdos y normativa de almacenamiento de gases.	35
3 Aplicación práctica.....	37
3.1 Propuesta de conversión.....	37
3.1.1 Características previas de las plataformas.	37

3.2 Estudio de viabilidad técnica.	43
3.2.1 Comparativa de sistemas aplicables.	44
3.2.1 Conversión de las lanchas de instrucción a dual fuel con GLP.	45
3.2.2 Conversión de las lanchas de instrucción a dual fuel con GNC.	49
3.2.3 Almacenamiento de los gases.	51
3.3 Estudio de viabilidad económica.	51
3.3.1 Balance de la inversión.	51
3.3.2 Variables económicas tenidas en cuenta.	52
3.4 Estudio de viabilidad financiera.	57
3.5 Estudio de viabilidad comercial.	57
4 Conclusiones.	61
5 Líneas futuras.	63
6 Bibliografía.	65

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1-1 Clasificación del gas dependiendo de su procedencia y almacenamiento.....	10
Figura 2-1 Clasificación de los motores térmicos	11
Figura 2-2 Clasificación de los Motores de Combustión Interna Alternativo.....	12
Figura 2-3 Motor diésel, 4T [12].....	13
Figura 2-4 Diagrama explicativo de la distribución de un motor 4T [10].....	14
Figura 2-5 Motor 2T genérico [10]	15
Figura 2-6 Esquema del sistema <i>common rail</i> [14].....	16
Figura 2-7 Ciclo teórico de combustión diésel P-v y T-s [15]	17
Figura 2-8 Diferencias entre el ciclo diésel real y teórico [16]	17
Figura 2-9 Áreas de Control de Emisiones (ECA's) [17]	19
Figura 2-10 Mapa de ratificación del acuerdo tomado en Doha 2012 [22].....	21
Figura 2-11 Esquema explicativo del sistema dual fuel	24
Figura 2-12 Inyección indirecta e inyección directa dual fuel [31].....	25
Figura 2-13 Estudio experimental y CFD de un motor. Diagramas <i>RoHR-Pressure/CAD</i> [1].....	26
Figura 2-14 Diagrama de combustión de motor dual fuel [1]	27
Figura 2-15 Tobera mezcladora de gas y aire [34].....	28
Figura 2-16 Inyección indirecta de gas con llama piloto [35].....	28
Figura 2-17 Inyector directo dual, Westport HPDI 2.0 [36]	29
Figura 2-18 Mapa de infraestructuras Enagas [42]	31
Figura 2-19 Diagrama de planta GNL a bordo de buque	33
Figura 2-20 Tubería MVIP [45]	34
Figura 3-1 Desarrollo de un análisis de viabilidad genérico	37
Figura 3-2 Esquema del motor Bazán MTU 16V 956 TB91 [47].....	38
Figura 3-3 Diagrama de apertura y cierre de válvulas [48].....	39
Figura 3-4 Corte de turbocompresor y enfriador del motor Bazán MTU 16V 956 TB91 [47].....	39
Figura 3-5 Sistema de inyección, bomba de inyección lineal [49].....	40
Figura 3-6 Motor Caterpillar C18 Recreativo [51]	41
Figura 3-7 Inyector bomba MCEU, Caterpillar C18 [52]	42
Figura 3-8 Funcionamiento del inyector bomba.	43
Figura 3-9 Esquema de recorrido del gas para dual fuel GLP	45
Figura 3-10 Boca de carga para gas	45
Figura 3-11 Tanque de almacenamiento de Gas Licuado de Petróleo	46
Figura 3-12 Electroválvula de seguridad y cierre.....	46
Figura 3-13 Línea de gas a alta presión.....	46

Figura 3-14 Gasificador de GLP	47
Figura 3-15 Reductor de presión	47
Figura 3-16 Filtro de gas	47
Figura 3-17 Rampa de 4 cilindros de gas	48
Figura 3-18 Centralita de control de gas	48
Figura 3-19 Conmutador diésel – dual fuel.....	48
Figura 3-20 Esquema de recorrido del gas para dual fuel GNC.....	49
Figura 3-21 Tanque de almacenamiento de Gas Natural Comprimido [32]	49
Figura 3-22 Electroválvula de alta presión [53].....	50
Figura 3-23 Líneas de gas fabricadas en acero [53].....	50
Figura 3-24 Reductor de presión [53]	50
Figura 3-25 Recuperación de la inversión en millares de euros y años	56

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2-1 Límites de NO _x liberado [5].....	19
Tabla 2-2 Límites de Azufre total en combustible [5]	20
Tabla 2-3 Equivalencias de contaminantes por grupos [19]	22
Tabla 2-4 Reducción de contaminantes en un motor dual fuel [25]	23
Tabla 2-5 Especificaciones a cumplir por el gas natural [39]	30
Tabla 2-6 Composición típica del gas natural [40]	31
Tabla 2-7 Poder calorífico del GLP [8].....	34
Tabla 3-1 Comparativa de ventajas e inconvenientes del GLP y GN	44
Tabla 3-2 Cálculo de tanques necesarios para garantizar la autonomía mínima.....	51
Tabla 3-3 Cálculo de la diferencia de coste de los combustibles	53
Tabla 3-4 Inflación según distintos organismos y empresas [57, 58, 59, 60]	54
Tabla 3-5 Cálculo del balance económico para el caso neutro	55
Tabla 3-6 Cálculo del balance económico para el caso pesimista.....	55
Tabla 3-7 Cálculo del balance económico para el caso optimista.....	55
Tabla 3-8 Balance económico de la inversión.....	56
Tabla 3-9 Presupuesto de modificación de las lanchas de instrucción para GLP y GNC [25]	57
Tabla 3-10 Horas navegadas por las lanchas de instrucción	58
Tabla 3-11 Consumo motor Caterpillar C18 [51]	59
Tabla 3-12 Consumos A-121 “G.M. Barrutia” en noviembre de 2017.....	59
Tabla 3-13 Consumos semanales A-121 “G.M. Barrutia” en noviembre de 2017	60
Tabla 3-14 Horas de navegación de las lanchas de instrucción para cada escenario	60

GLOSARIO DE TÉRMINOS.

ECU: *Electronic Control Unit.*

ENM: Escuela Naval Militar.

GLP: Gas Licuado de Petróleo.

GNC: Gas Natural Comprimido.

GNL: Gas Natural Licuado.

IMO: *International Maritime Organization.*

MCIA: Motores de Combustión Interna Alternativos.

MEC: Motores de Encendido por Compresión.

MEP: Motores de Encendido Provocado.

PMI: Punto Muerto Inferior.

PMS: Punto Muerto Superior.

RSC: Responsabilidad Social Corporativa.

1 INTRODUCCIÓN Y CONTEXTUALIZACIÓN.

El mundo actual es dinámico y cambiante, focalizado en la sostenibilidad y el medioambiente, pero también sobre los aspectos económicos. La sostenibilidad ha de ser entendida como cualidad característica del desarrollo que, salvaguardando la necesidad de generaciones venideras, asegura cubrir las exigencias del presente. Así, la cohesión de estos aspectos es fundamental en cualquier estudio relacionado con la tecnología y el futuro, y por tanto, también lo será en el presente trabajo.

La Armada Española juega aquí un papel muy importante, puesto que ha de trabajar siempre por ser un referente en cuanto a sostenibilidad y preservación del medio ambiente, y además tratar de minimizar los costes que supone al estado.

En la actualidad los buques de la Armada Española operan con motores diésel. Este tipo de motores son potentes, fiables, económicos y relativamente sencillos de mantener. En contra de lo que en un principio se pensaba, en los últimos años se ha demostrado que los productos contaminantes generados por estos motores tienen gran importancia [1, 2, 3].

Sin embargo, no solo en la Armada se usan este tipo de motores. Se calcula que el 80% del transporte a nivel mundial se realiza a través del mar [4], sirviéndose para ello de combustibles fósiles, casi en su totalidad. Dichos combustibles son causantes de una parte importante de las emisiones de gases contaminantes liberados a la atmósfera donde cabe destacar el CO₂, NO_x y también el SO_x [5]. Por consiguiente se analizan formas de, si no eliminar estos productos por ser muy difícil en la práctica, minimizarlos.

En el contexto descrito surge la idea de utilizar un combustible más limpio, como es el gas. Para hacer provechosa dicha solución recientemente se realizan conversiones sobre los motores diésel existentes para su operación con gas y diésel. Una importante ventaja es la utilización de las mismas plataformas y motorizaciones sin necesidad de reemplazarlas. El uso de un gas combinado con diésel permite reducir la emisión de gases contaminantes a la par que prácticamente mantiene las prestaciones de los motores existentes a bordo de los buques [6].

Es necesario resaltar las diferencias entre los dos tipos de gases utilizados más comúnmente, ya que varían tanto en la composición como en las características que presentan. En primera instancia el gas se puede clasificar según su procedencia, para posteriormente clasificarlo dependiendo de la forma en que se almacena (Figura 1-1).

El gas puede provenir del refinado de petróleo o directamente como un recurso natural en sí mismo. El gas derivado del petróleo se almacena normalmente comprimido, y se conoce como GLP (Gas Licuado de Petróleo). Por otra parte, el gas como recurso natural se denomina, según si está comprimido y a temperatura ambiente GNC (Gas Natural Comprimido), o por el contrario se

encuentra a temperatura muy baja y presión prácticamente atmosférica, GNL (Gas Natural Licuado). A la combinación de diésel y gas, se conoce como GLP, GNL o GNC - diésel dual fuel [7, 8].

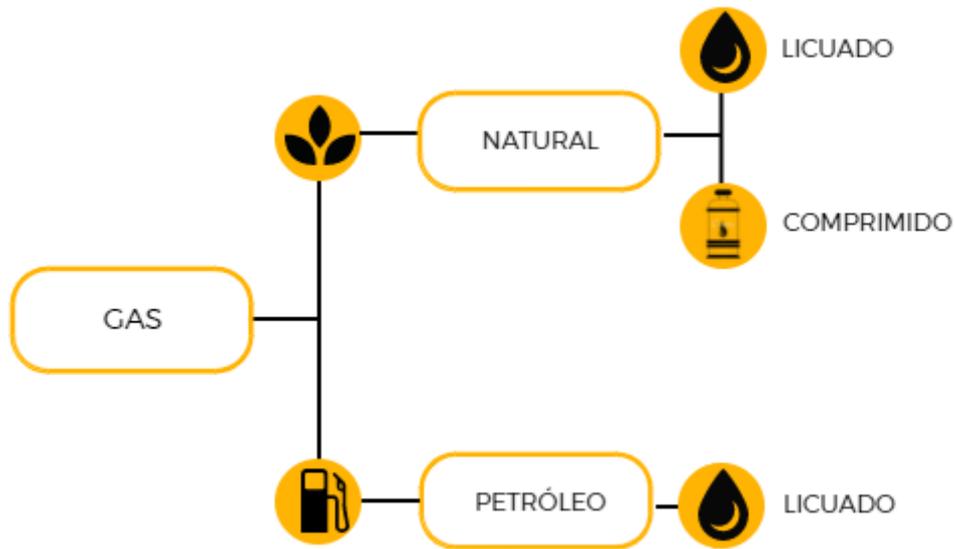


Figura 1-1 Clasificación del gas dependiendo de su procedencia y almacenamiento

1.1 Objetivos y planteamiento.

El objetivo del presente trabajo es el estudio de la aplicación en la Armada Española de la tecnología de conversión de un motor marino diésel a dual fuel. En consecuencia, deben de analizarse las modificaciones necesarias para realizar la conversión y su posible aplicación a distintas plataformas para que puedan operar en modo combinado de gas y diésel.

Para ello, se organiza el trabajo en diversos apartados.

En la primera parte se motiva el trabajo indicando los objetivos y el guion que seguirá este estudio. Además, se razona la importancia de la tecnología dual fuel y su aplicación en los ámbitos de la Armada y marinas mercantes.

La segunda parte resume los ciclos de trabajo de los motores térmicos, así como la normativa en vigor sobre contaminación y transporte marítimo. Además, se caracteriza la tecnología dual fuel, tanto en la dinámica que sigue en la combustión, como en las partes que lo componen. Se citan y definen los tipos de combustibles gaseosos aplicables a este estudio, así como la forma de almacenamiento. Por último, se reseña la reducción en cuanto a contaminación que se espera obtener de la aplicación del dual fuel. Esto es una de las principales ventajas que ofrece este sistema, por el cual las emisiones se reducen, así como los costes.

El tercer apartado se dedica a la aplicación de esta tecnología a la Armada. En él se planifica la instalación teórica del sistema a bordo de dos unidades distintas, alentando así el estudio de distintas opciones. Se tienen en cuenta para ello tanto variables técnicas como económicas.

En el cuarto apartado se exponen las conclusiones destacables de este trabajo. Se analiza la rentabilidad del proyecto.

Finaliza el trabajo planteando las líneas de futuro, en cuanto a estudio y desarrollo del trabajo. Además se orientan posibles mejoras futuras.

Quedan citadas las fuentes de información utilizadas en el trabajo en el último apartado dedicado a la bibliografía.

2 ESTADO DEL ARTE.

2.1 Motores de combustión interna alternativos.

Los motores térmicos son dispositivos que transforman la energía térmica de un fluido compresible en energía mecánica. Los motores que utilizan un combustible a fin de obtener esta energía térmica se denominan motores de combustión [9].

Estos motores se pueden clasificar dependiendo de dónde se realiza la combustión. Si esta se realiza en la misma cámara en que se encuentra el fluido de trabajo se denominan “de combustión interna”. Un ejemplo de estos motores son los motores diésel. Los motores de combustión externa son aquellos en que la combustión tiene lugar en un sitio distinto a dónde se encuentra el fluido de trabajo. Como ocurre en las máquinas de vapor [10].

En los motores de combustión interna el fluido de trabajo actúa en las partes móviles para desplazarlas en movimiento rotativo o lineal. Se conocen como motores de combustión interna rotativos y alternativos, respectivamente. Un motor alternativo es cualquier motor diésel, así como un motor rotativo es el motor Wankel [10]. Este desarrollo se sigue en la Figura 2-1.

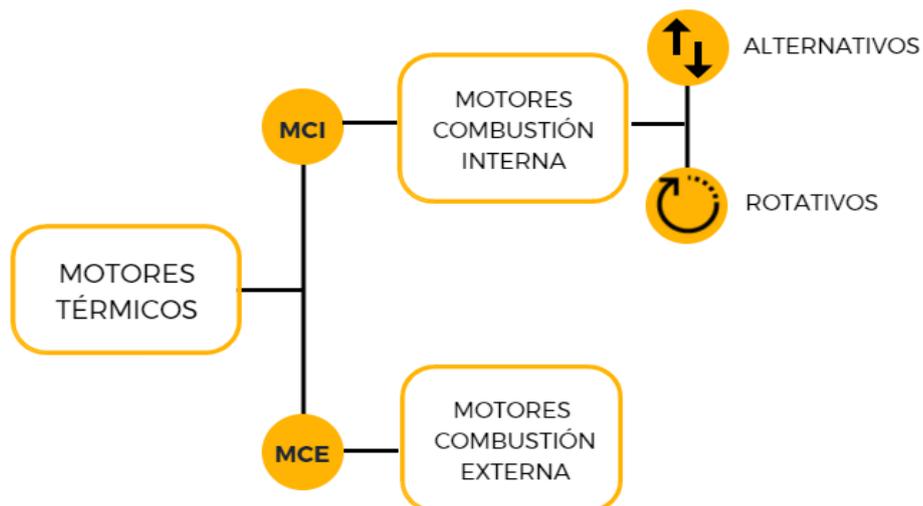


Figura 2-1 Clasificación de los motores térmicos

Los motores marinos de gran potencia que usan combustibles fósiles son, generalmente, motores de combustión interna alternativos. Además, en su gran mayoría, la flota de gran desplazamiento utiliza motores diésel para propulsión.

2.2 Clasificación de los motores de combustión interna alternativos.

Un motor de combustión interna alternativo es, entonces, un dispositivo que transforma la energía térmica proveniente de la combustión de un fluido compresible para generar trabajo en forma de movimiento lineal [9].

En el grupo de los motores de combustión interna alternativos, además, es necesario realizar dos divisiones independientes. La primera hace referencia al proceso de combustión que seguirán. La otra forma de catalogarlos será mediante el ciclo de trabajo de la máquina, como se reseña en la Figura 2-2.

Según el proceso de combustión que siguen se clasifican en motores de encendido provocado (MEP) y de encendido por compresión (MEC).

En lo que al ciclo de trabajo se refiere, las divergencias radican en el número de carreras que realiza el pistón para completar un ciclo útil de trabajo. Siguiendo este patrón se pueden diferenciar los motores de dos tiempos (2T) y los de cuatro tiempos (4T) [10].

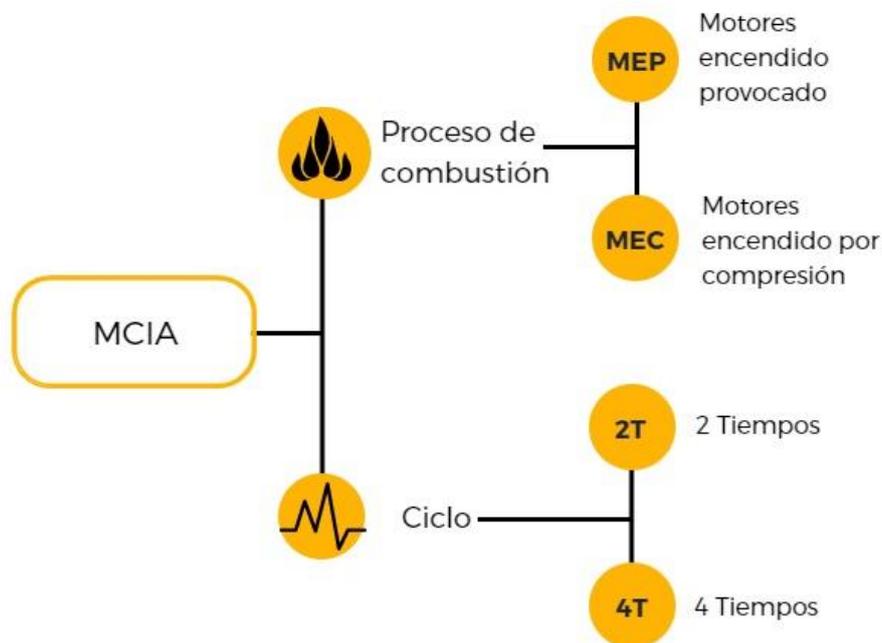


Figura 2-2 Clasificación de los Motores de Combustión Interna Alternativo

2.2.1 Motores de encendido provocado.

Los motores MEP (Motores de Encendido Provocado) necesitan de un elemento externo al ciclo termodinámico que provoque el inicio de la combustión. En motores modernos, se produce debido a la chispa que una bujía hace saltar entre sus dos electrodos. La mezcla de aire y combustible se puede realizar previamente a la entrada en el cilindro (carburación o inyección indirecta), o bien puede ser que en el cilindro en el que entra aire durante la admisión y durante la compresión se inyecta el combustible directamente en la cámara de combustión (inyección directa). En ambos, la combustión se realiza siguiendo el avance del frente de llama que recorre la cámara [11].

2.2.2 Motores de encendido por compresión.

Los motores MEC (Motores de Encendido por Compresión) son aquellos en los que no hace falta una fuente externa para comenzar la ignición del combustible. La combustión comienza una vez que en el cilindro se llega a la temperatura de auto-ignición. El aumento de temperatura es debido a la compresión del aire en la cámara de combustión. La inyección del combustible se realiza por lo general al final de la carrera del pistón, cuando la temperatura es alta. Típicamente son conocidos como motores diésel [11].

Mientras que en los MEP el frente de llama se puede localizar y está bien definido, en los MEC la mezcla es más heterogénea. Hay partes donde la mezcla aire-combustible es óptima y es en estos puntos donde comienza la combustión simultáneamente. Varios puntos con estas condiciones provocarán distintos frentes de llama. La evolución de estos estará regulada por el tiempo, las características de inyección y el movimiento del aire en el cilindro [9, 10, 11].

En la actualidad se están desarrollando una serie de prototipos que utilizan el encendido por compresión con mezcla homogénea. Para que esta mezcla sea uniforme se ha de realizar previa a su entrada en la cámara de combustión, de la misma manera que ocurre en los MEP. En estos modelos se estudia la posibilidad de utilizar combustibles de MEP y se conocen como CAI (*Controlled Auto-Ignition*), de la misma manera ocurre con los combustibles típicos de MEC, en este caso se estudian como HCCI (*Homogeneous Charge Compression Ignition*) [10].

2.2.3 Motores de cuatro tiempos.

El motor que por cada ciclo de trabajo útil realiza cuatro carreras del pistón (2 vueltas completas de cigüeñal) se denomina motor de cuatro tiempos (4T). El ciclo de trabajo que siguen este tipo de motores es, exceptuando puntualizaciones posteriores, el que se desarrolla en la Figura 2-3 [11].

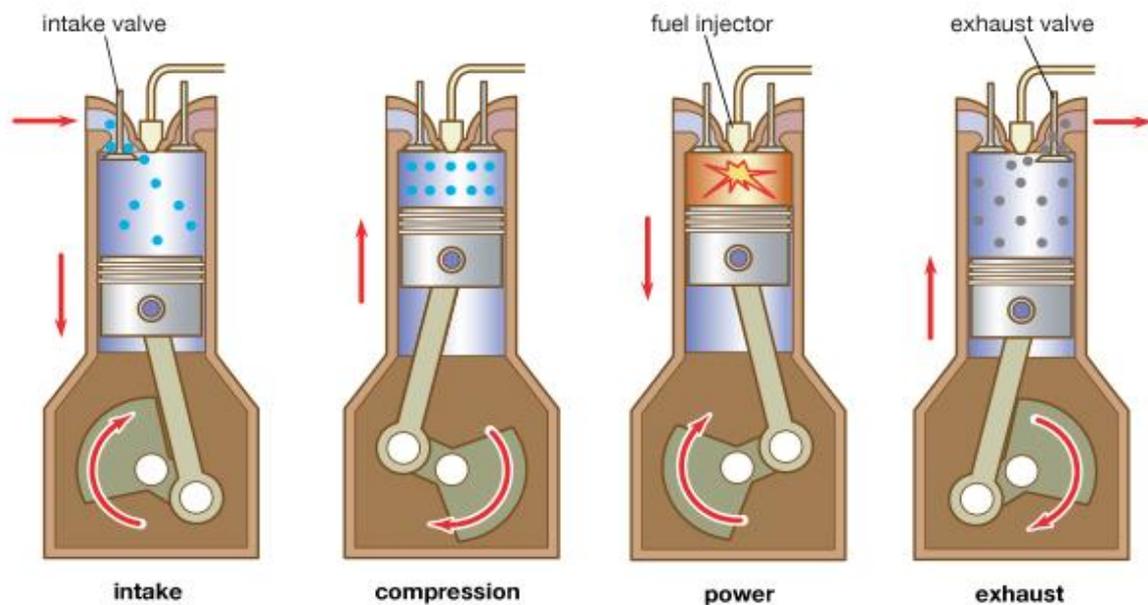


Figura 2-3 Motor diésel, 4T [12]

1. **Admisión (*Intake*):** Comienza el pistón desde el Punto Muerto Superior. La válvula de admisión de aire se abre al comienzo de esta fase. El pistón realiza la carrera de bajada, hasta el Punto Muerto Inferior. Con esta carrera de bajada en el cilindro se crea una pequeña depresión, la cual permite la entrada del aire de admisión, mezcla de aire y gas si se trata de un motor MEP. De esta manera el cilindro se llena de aire o mezcla. Al final de esta etapa las válvulas se cierran.
2. **Compresión (*Compression*):** Comienza la carrera ascendente del pistón hacia el Punto Muerto Superior. Esta compresión hace que la temperatura de los gases en su interior aumente. En este período las válvulas permanecen cerradas todo el tiempo.
3. **Combustión/Explosión Expansión (*Power*):** Con las válvulas cerradas el aire o mezcla a alta temperatura y el pistón en el PMS, se produce la inyección del diésel o el salto de la chispa. La combustión produce un aumento de presión que realiza trabajo sobre el pistón en la carrera de bajada hasta el PMI.
4. **Escape (*Exhaust*):** El pistón realiza la carrera ascendente barriendo los gases, producidos por la deflagración dentro de la cámara de combustión. Al comienzo de esta fase se abre la válvula de escape para permitir la salida de los gases.

Este ciclo es simplificado y ligeramente distinto del real. Con el fin de optimizar el proceso real es necesario introducir una serie de modificaciones en los tiempos de apertura y cierre de válvulas, así como en las inyecciones o encendidos Figura 2-4. Los avances y retrasos se medirán en grados de cigüeñal, antes o después del PMS o PMI [10]. Se seguirá el mismo guion temporal que en la explicación anterior a fin de poder seguir ambas paralelamente.

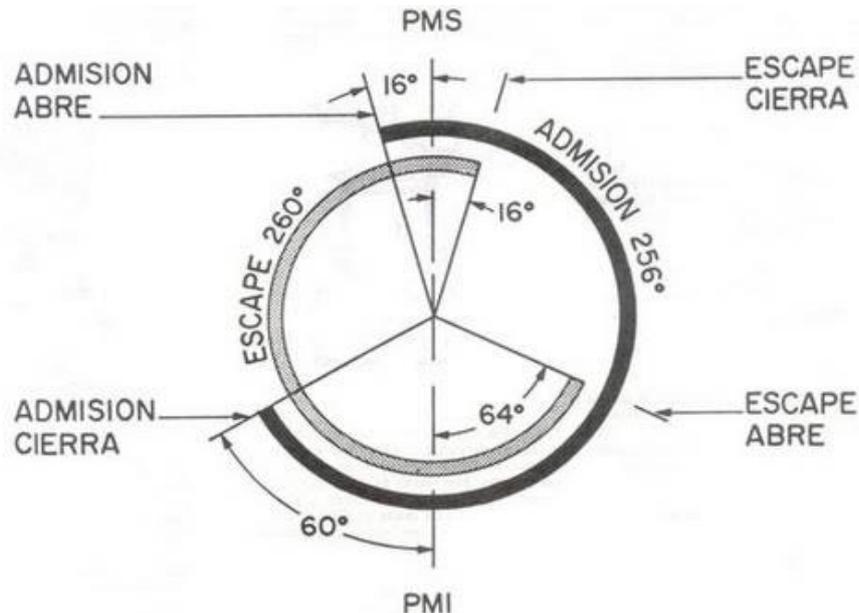


Figura 2-4 Diagrama explicativo de la distribución de un motor 4T [10]

- Avance en la Apertura de Admisión (AAA): Ángulo desde el inicio de la apertura de la válvula de admisión hasta el PMS. El comienzo prematuro se debe a que la apertura de los mecanismos no son instantáneos. De otro lado, el gas entrante empuja a los gases quemados y limpia la cámara ayudando así en el barrido.
- Retraso del Cierre de Admisión (RCA): Ángulo de cigüeñal desde el PMS hasta el cierre de la válvula de admisión. Este aplazamiento optimiza la entrada de aire a la cámara de combustión. La inercia de entrada debido a la velocidad de los gases de la admisión hace que siga fluyendo el aire a pesar de haber finalizado la carrera descendente del pistón.
- Avance de Inyección (AI) o Avance de Encendido (AE): Ángulo hasta el PMS que se avanzan la inyección del combustible (MEC) o el encendido (MEP) para facilitar la combustión. Puesto que combustión no suele ser instantánea, se opta por adelantar la inyección o el encendido.
- Avance de Apertura del Escape (AAE): Ángulo desde el inicio de la apertura del escape hasta el PMI. El objeto de esto es aliviar la presión en el cilindro. Con menor presión se reduce la cantidad de trabajo realizado por el motor en la fase de escape. Por el contrario, es necesario tener en cuenta la pérdida de trabajo que supone aliviar la presión en la carrera de expansión. Así, hay que tener en cuenta ambas pérdidas para que la diferencia entre ellas resulte positiva.
- Retraso de Cierre de Escape (RCE): El ángulo que gira el cigüeñal desde el PMS hasta el cierre del escape. Este retraso favorece el llenado inicial y la expulsión de los gases de escape. Esto se debe a la inercia de los gases salientes.

La unión de los ángulos de retraso de cierre del escape (RCE) y avance de apertura de admisión (AAA) se conoce como “cruce de válvulas”. En este momento se encuentran las válvulas de admisión y escape abiertas [10].

Todos estos valores, para ser optimizados, dependen varios factores como el régimen de giro del motor o la construcción del mismo.

2.2.4 Motores de dos tiempos.

Los motores de dos tiempos (2T) completan un ciclo cada vez que el motor realiza una carrera ascendente y otra carrera descendente [9].

En líneas generales este tipo de motores realiza las mismas fases que un motor 4T, pero se diferencia de este en el proceso de renovación del aire. Los tiempos de admisión y escape se realizan simultáneamente. Esto se basa en que el aire entrante empuja a los gases quemados en la combustión para expulsarlos. A este proceso se le denomina barrido de los gases de escape [9].

Las etapas de compresión y combustión/explosión expansión son análogas al motor 4T. Aunque también tienen sus pequeñas diferencias dado que, por ejemplo, la apertura del escape se realiza antes de lo que suele suceder en un motor 4T.

Para la apertura y cierre de la admisión se pueden usar válvulas, como ocurriría en los motores 4T, o bien se puede utilizar un sistema basado en lumbreras de admisión y escape. Las lumbreras son unos orificios practicados en la propia camisa del pistón y el bloque motor, los cuales son abiertos o cerrados por el pistón en su carrera de subida y bajada. Este sistema es muy común en estos motores así como la combinación de lumbreras de admisión y válvulas de escape. Véase la Figura 2-5 [10].

Como se ha mencionado anteriormente, este sistema elimina las dos carreras que los motores de cuatro tiempos realizan para la admisión, así como para el escape. Para esto, cuando el pistón se encuentra en la carrera descendente de expansión, abre la válvula o lumbrera de escape y los gases de la combustión salen por ella. El escape se realiza por efecto de la diferencia de presión, mayor en el cilindro que en el exterior. Más adelante, la lumbrera o válvula de admisión se abre para dejar pasar los gases, o la mezcla fresca, realizando el barrido de los gases quemados remanentes en el cilindro. En este momento el pistón no ha llegado aún al PMI, por lo que el proceso de barrido comienza antes del PMI y finaliza después de este al comenzar el pistón su carrera hacia el PMS [10].

Nótese que en el caso de que la admisión y/o el escape se realicen por medio de lumbreras el ángulo de apertura y de cierre será simétrico. En un motor de dos tiempos los gases de admisión pueden entrar directamente al cilindro o pasar primero por el propio cárter del motor. Si los gases de admisión pasan por el cárter, se diferenciarán las lumbreras de admisión al cárter y la de transferencia.

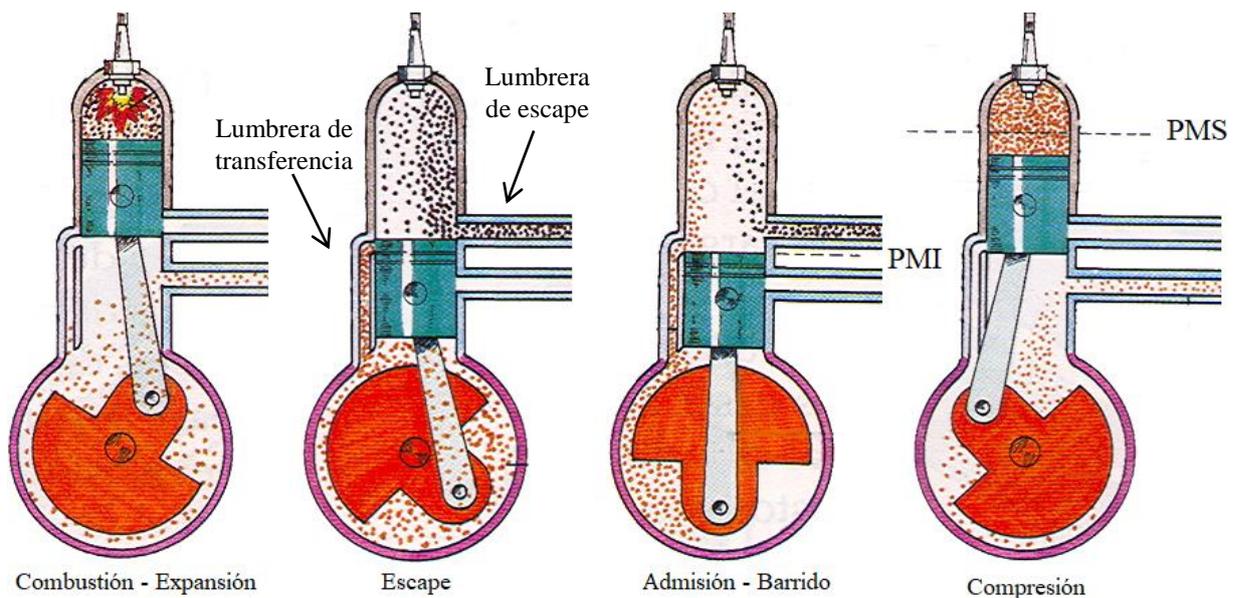


Figura 2-5 Motor 2T genérico [10]

2.3 El motor diésel.

En el sector naval, los motores diésel son de uso muy extendido por las ventajas que ofrecen. En este tipo de motores, uno de los pilares fundamentales de cualquier equipo a bordo de un buque ha de ser la fiabilidad. Además, los equipos han de ser lo más sencillos posible, dado que ha de ser posible realizar reparaciones sobre ellos en condiciones de navegación. En ocasiones las reparaciones en la mar son necesarias y no es posible poseer todo el material de recambio necesario, o incluso toda la herramienta deseable. De otro lado, la economía en estos equipos es un punto a tener en cuenta, sobre todo en el sector naval, debido al número de horas que han de permanecer en funcionamiento. Por último, los motores diésel ofrecen característicamente alto par y grandes potencias. La combinación de estas características hace que su uso en el sector naval esté muy extendido [13].

2.3.1 Historia del motor diésel.

La invención de los precursores del motor diésel, motores que quemaban aceites vegetales, tuvo lugar entre los años 1893 y 1897 por el ingeniero alemán Rudolf Christian Karl Diesel, del que obtienen nombre y forma. Presentado por primera vez su prototipo en el año 1900 por la casa MAN [11].

Desde entonces hasta ahora los avances más importantes en estos motores han sido en lo referente a la inyección del combustible. Partiendo del motor original, donde el combustible era inyectado mediante aire a presión en el cilindro, su régimen de giro era lento en torno a 100 o 200 rpm. Lo que se mantuvo hasta que Bosch inventó las bombas de inyección en línea. Dichas bombas se comenzaron a comercializar en los motores Mercedes que montaba el modelo 260D en el año 1937, un motor de inyección indirecta (en pre-cámara) que desarrollaba 34 kW a 3000 rpm. A partir de este momento el desarrollo en los inyectores fue continuo, se obtuvieron sistemas más complejos y eficientes como puede ser en los años 60 la bomba de inyección rotativa. No fue hasta el 1984 cuando se lanzó la primera bomba rotativa controlada electrónicamente, aunque no tuvo gran éxito debido al potencial que ofrecía en aquel momento el sistema conocido como “*common rail*” presentado en 1995 (Figura 2-6). Sin embargo el desarrollo de los sistemas de inyección electrónicos continuó en paralelo siendo implantado el inyector bomba en motores Caterpillar a partir del año 1997 [9, 10].

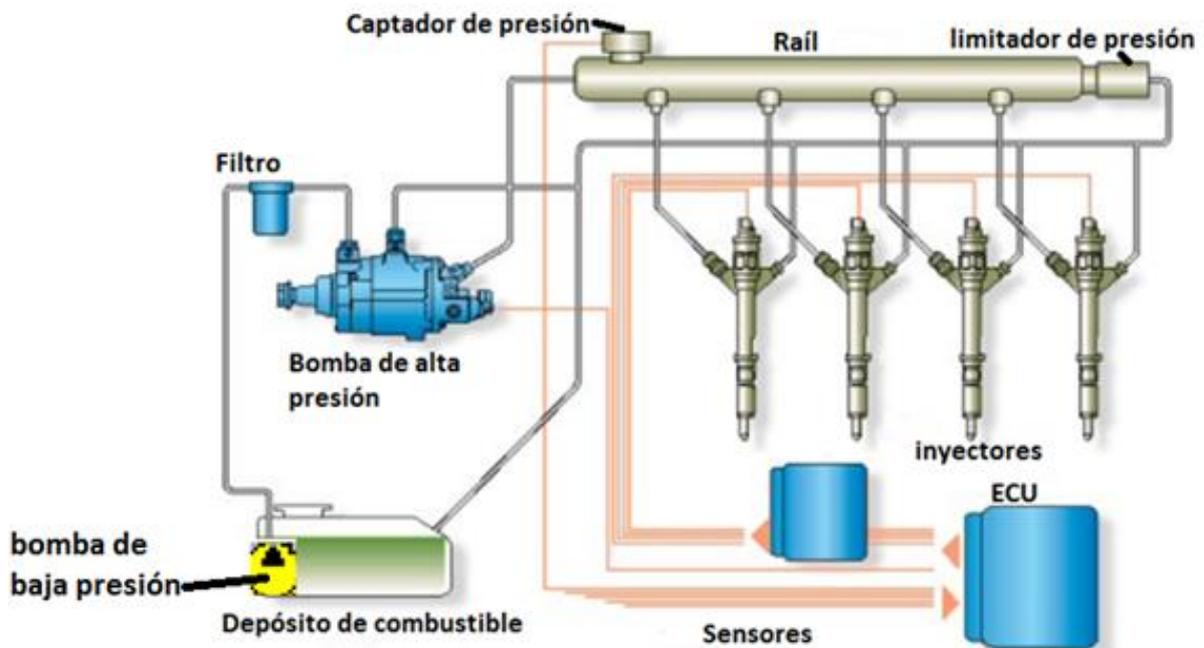


Figura 2-6 Esquema del sistema *common rail* [14]

2.3.2 Ciclo teórico de los motores diésel.

El ciclo teórico es el conjunto de procesos termodinámicos que ocurren teóricamente dentro de un fluido, desde un punto hasta regresar a él. Se plantea este ciclo termodinámico para facilitar el estudio teórico del sistema, puesto que son aproximaciones simplificadas de la realidad. Cuando se habla de variables termodinámicas se ha de asumir que la energía en el volumen de control permanece constante. Este sistema intercambia calor (Q) y trabajo (W) con el exterior [15].

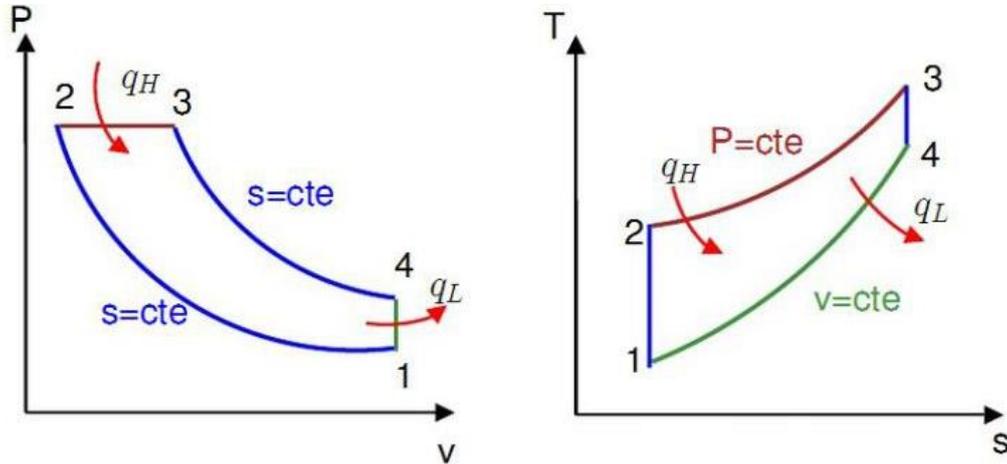


Figura 2-7 Ciclo teórico de combustión diésel P-v y T-s [15]

Estos ciclos son una aproximación basada en el uso de aire ideal en el cilindro y transferencia de calor entre el sistema y el exterior. Como se aprecia en la Figura 2-7:

1. La primera fase (1-2), consta de una compresión del fluido en el cilindro adiabática e isoentrópica.
2. La segunda fase (2-3), se sustenta en una aportación de calor desde el exterior a presión constante, simbolizando la combustión.
3. La tercera fase (3-4), radica en la expansión de aire adiabáticamente e isoentrópicamente.
4. La cuarta fase (4-1), se realiza transferencia de calor hacia el medio de forma isócara, asemejándose al escape de los gases.

Sin embargo, estos procesos son simplificaciones de la realidad. Existen una serie de suposiciones que hace falta tener en cuenta para este ciclo que no se pueden llevar a cabo en la realidad. Esta serie de suposiciones disminuyen la eficiencia del motor, como se puede observar en la Figura 2-8 [11].

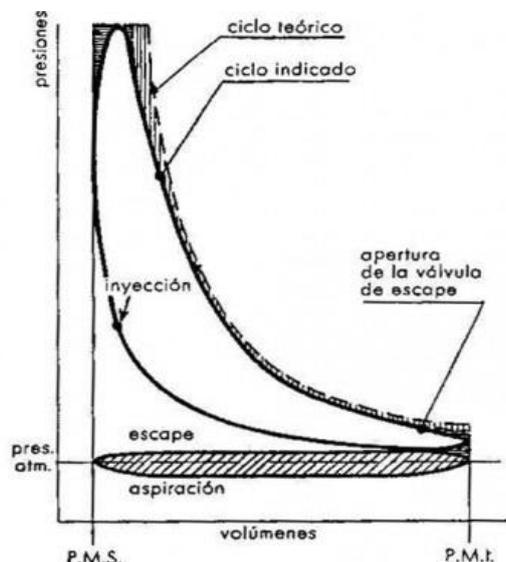


Figura 2-8 Diferencias entre el ciclo diésel real y teórico [16]

- Se supone la inyección del combustible perfectamente homogénea e instantánea, pero esto en la actualidad no es posible de garantizar. Sin embargo, la inyección comienza ligeramente antes del PMS para minimizar los efectos del retardo producido por esta inyección.
- La ignición del combustible no es instantánea y perfecta a presión constante, sino más bien se produce un pico de presión y el resto de combustible se quema por difusión mientras el pistón desciende.
- Los gases de escape son expulsados ligeramente antes de que el pistón llegue al PMI, por lo que se pierde trabajo en esta apertura prematura de la válvula de escape. Esta apertura tiene que ver con el tiempo de apertura de las válvulas que no es instantáneo y además con la reducción del trabajo de expulsión de los gases quemados.
- Los gases de escape son empujados a presión mayor que la atmosférica para ayudar a su salida del cilindro. Si la apertura de la válvula de escape no deja salir el aire antes de comenzar esta fase entonces el trabajo para expulsar los gases será mayor y con ello la eficiencia menor.
- La admisión también absorbe parte del trabajo puesto que para succionar los gases entrantes el motor ha de crear una presión menor que la atmosférica con su carrera descendente para facilitar el llenado del cilindro [10].

2.4 Normativa y emisiones.

En la actualidad, una de las principales preocupaciones es en el cuidado del medio ambiente y la minimización de las emisiones de contaminantes. Para llevar estos objetivos a cabo la sociedad demanda la tecnología y los medios precisos. Además de la sociedad, distintas organizaciones también tratan este tipo de temas imponiendo normas y restricciones a empresas, flotas y particulares.

Un claro ejemplo de las nuevas normas y reglas es el sector marítimo. Aquí se implantan una serie de limitaciones dependiendo de distintas variables como el momento de construcción y sobre todo los contaminantes emitidos, derivados en su mayoría del uso de combustibles fósiles.

2.4.1 Normas sobre contaminación en la mar.

En general la norma de la que emanan el resto es el convenio MARPOL (*Maritime Policy*). Esta norma es dirigida por la Organización Marítima Internacional (IMO por sus siglas en inglés).

El convenio MARPOL 73/78, nace del Convenio Internacional para prevenir la contaminación de los buques en 1973 que sin entrar en vigor se modifica en 1978. Los accidentes de diversos buques mercantes impulsaron esta modificación. Más tarde, en 1997 se actualiza este documento con el “1997 Protocol”, donde se introduce el Anexo VI “Regulaciones para prevenir la polución del air proveniente de los barcos”. Es en el Anexo VI donde se establecen regulaciones y límites en las emisiones de NO_x y SO_x en los gases de exhaustación. Este anexo ha sido ratificado por un número cada vez mayor de países, si bien España ha participado de ellos desde su creación. El objeto de las continuas revisiones y adopción de medidas restrictivas es la progresiva introducción de las tecnologías de reducción de la contaminación [5].

Las limitaciones se aplican en tres tipos de zonas distintas; las Áreas de Control de Emisiones (ECA por sus siglas en inglés), las Áreas de Control de Emisiones de Azufres (SECA) y el resto del territorio marítimo. Las Áreas de Control de Emisiones registran límites especiales para la cantidad de NO_x emitido en ellas, así como el azufre presente en el combustible. De otro lado en las Áreas de Control de Emisiones de Azufre se regula la cantidad de azufre presente en el combustible, siendo las emisiones de NO_x las mismas que se regulan en el resto del globo. Todas estas áreas así como las que se prevé que sean establecidas en el futuro se indican en la Figura 2-9.



Figura 2-9 Áreas de Control de Emisiones (ECA's) [17]

Las Áreas de Control de Emisiones son las más restringidas en cuanto a emisiones y es aquí donde únicamente se impone el “Tier III”, mientras que a nivel global, como en las áreas de control de emisión de azufre (SECA), el máximo de emisiones viene restringido por el “Tier II”. Los máximos en cuanto a emisiones se aplican en función del número de revoluciones, y la potencia del motor [17].

Las normas reguladas en el Anexo VI se aplican sobre motores con potencias superiores a 130 kW con la condición que estos no posean otro tipo de restricción propia del país en que navegan, no pudiendo salir de las aguas jurisdiccionales del estado del cual enarbolan el pabellón. Además de cualquier buque al que se realice una transformación importante en sus motores. No se considera transformación la sustitución de un motor por otro idéntico [17].

Los buques de guerra así como unidades navales auxiliares y buques que prestan servicios gubernamentales con fines no comerciales no serán objeto de aplicación directa de esta norma. Esto no exime a los países implicados en el Convenio debido a que dentro de lo razonable y practicable deberán adoptarla en tanto que esto no afecte a la capacidad operativa u operaciones que vayan a realizar. Esto aparece recogido en el Artículo 3º del presente Convenio [17].

2.4.1.1 Regulaciones sobre NO_x y SO_x.

Las regulaciones que se tienen en cuenta en cuanto a NO_x aparecen reflejadas en la Tabla 2-1. Cabe destacar que hay que tener en cuenta, además del año de fabricación del buque o de modificación del motor, el régimen dinámico de revoluciones. Para ello se implementa la variable “n”, el número de rpm.

Norma	Año entrada en vigor	Restricciones en g/kWh		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Tier I	2000	17	45 · n ^{-0,2}	9,8
Tier II	2011	14,4	44 · n ^{-0,23}	7,7
Tier III	2016 (ECA)	3,4	9 · n ^{-0,2}	1,96

Tabla 2-1 Límites de NO_x liberado [5]

En cuanto al contenido en azufre total contenido en el fueloil a bordo de cualquier buque, teniendo en cuenta las posibles impurezas, se ha de garantizar por el proveedor según la Tabla 2-2.

Fecha de entrada en vigor	Límite de azufre en combustible % masa	
	ECA o SECA	Global
2000	1,5 %	4,5%
2010.07	1,0 %	
2012		3,5 %
2015	0,1 %	0,5 %
2020		

Tabla 2-2 Límites de Azufre total en combustible [5]

2.4.1 Acuerdos en materia de contaminación y huella ecológica.

La formación de gases contaminantes es un efecto directo de la ignición de combustibles fósiles. Por ello uso de estos combustibles supone una carga negativa para el medio ambiente. Así este tipo de emisiones se tratan de minimizar a niveles que afecten en menor medida a nuestro entorno [18].

En este apartado se encuentra el punto fuerte del desarrollo de estos motores. Los motores dual fuel son por lo general menos contaminantes que sus predecesores, los diésel. Es por esta mayor limpieza de combustión y gases de escape que comienza la transformación de la flota mundial al dual fuel o a los motores de gas [6].

Los compromisos entre gobiernos comienzan como respuesta a la demanda del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) por una limitación en cuanto a las emisiones al medio ambiente y el cambio climático. La política de emisión de gases de efecto invernadero comienza con la ONU a la cabeza para involucrar a gran cantidad de países en el mundo, aunque en la actualidad ha perdido continuidad disgregándose el grupo de países miembros del Protocolo de Kioto [19].

2.4.1.1 Realizados bajo el amparo de la ONU.

El acuerdo, Protocolo de Kioto, cuenta con medidas de importante entidad que fueron firmadas en diciembre de 1997 sin entrar en vigor hasta el año 2005. Se encuentra bajo el amparo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). El objetivo es la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero en varias etapas [20].

Con el objetivo de tener un valor de referencia histórico se establecieron como referencia base las emisiones del año 1990. En el Protocolo de Kioto se regula que en el período de 2008 a 2012 se produzca una reducción de la emisión de gases contaminantes en al menos un 5% en el cómputo global. En lo que respecta a España, se compromete a disminuir su tasa de emisiones en un 8% con respecto al periodo base en los años 2008 a 2012 [21].

En 2006 se comienza a estudiar la posibilidad de alargar este compromiso más allá de una única etapa. Finalmente en el año 2012 en la Cumbre de Doha se da continuidad al tratado en cuestión, desde el año 2013 hasta el 2020. Con el objetivo de continuar con la reducción de la contaminación se limita la emisión de gases de efecto invernadero a un 80 % sobre el periodo base. En todo el mundo, 109 países ratificaron este acuerdo (Figura 2-10), aunque algunos de los países más industrializados dieron la espalda a esta prórroga. Algunos ejemplos de esto son Estados Unidos, Rusia y Canadá.



Figura 2-10 Mapa de ratificación del acuerdo tomado en Doha 2012 [22]

Por su parte España, al igual que el resto de países de la Unión Europea se propone disminuir el 21% de las emisiones sobre el año de referencia. Cabe destacar que, según se cita en el tratado de Doha 2012, “la Unión Europea y sus Estados miembros, para un segundo período de compromiso del Protocolo de Kyoto, se basan en el entendimiento de que dichos compromisos serán cumplidos conjuntamente por la Unión Europea y sus Estados miembros” [22].

En el año 2015 tuvo lugar la CoP-21 (por sus siglas en inglés *Conference of the Parties*) en París. Con esta reunión se pretende concienciar a los países de la necesidad de continuidad de las medidas adoptadas hasta el momento. Se hace hincapié en la exigencia de no sobrepasar los 2 °C de aumento de las temperaturas globales. De otra parte se apremia a los países miembros a frenar el aumento en 1,5 °C con respecto a los años pre-industriales [20].

2.4.1.2 Realizados bajo el amparo de la UE.

Complementando al Protocolo de Kioto la Unión Europea crea un grupo de Estados miembros en el que están obligados todos como un conjunto a cumplir dicho tratado. Para facilitar el crecimiento entre países se crea entonces lo que se conoce como “Comercio de derechos de emisiones”. Una medida con la que incentivar a las empresas a disminuir la cantidad de gases contaminantes emitidos. Esta medida se aplica únicamente a empresas de generación de energía, generación de potencia a través de combustión y empresas que requieran gran cantidad de energía. Las medidas de limitación de emisiones de gases contaminantes se aplican a aquellas empresas que generan una liberación de calor mayor de 20 MW pero no a organismos militares [23].

Este comercio de derechos es, por tanto, una herramienta que regula la cantidad de contaminantes que una empresa puede emitir. Si dicha empresa emite menor cantidad de contaminantes que los que le corresponden, entonces, podrá vender los derechos de emisión sobrantes a otra empresa. Controlando así qué empresa puede emitir y en qué cantidad. Además, así se motiva la eficiencia energética y la preservación del medio ambiente de una forma que afecta directamente a las empresas, como es la economía [23].

Con perspectiva de futuro la Unión Europea recoge el testigo en cuanto a emisión de gases de efecto invernadero y crea el “Marco de Políticas de Energía y Cambio Climático 2030”. Se dedica así a proseguir el camino que en un principio marcó la ONU, pero que no parece muy clara su continuidad. En este “Marco 2030” se propone como objetivo la reducción de un 40% de los gases de efecto invernadero [21].

2.4.1.3 Coste de emisiones.

Existen algunos mercados de valores en los que se comercia con los derechos de emisión. Como valor de mercado dichos derechos se conocen como EU ETS (*European Union Emissions Trading System*). Por ejemplo, estas transacciones se pueden realizar en el *European Energy Exchange* o *EEX*. En ellos las emisiones se venden por Euros por tonelada de CO₂ equivalente.

En los últimos 3 años los derechos de emisión han tomado valores desde los 5 €/tCO₂ hasta los 11 €/tCO₂, aunque se han mantenido en aproximadamente 7,83 €/tCO₂ [24].

Debido al fluctuante valor de los derechos de emisiones, se baraja la posibilidad de unir los mercados de emisiones de Europa, China y Corea para estabilizar y hacer más líquido el comercio de estos índices.

2.4.1.4 Huella de carbono.

Sobre el concepto de tonelada de CO₂ equivalente se desarrolla el concepto de huella de carbono. Esta huella es la equivalencia de Gases de Efecto Invernadero, en toneladas de CO₂ equivalente, que un producto emite a la atmósfera. Esta medición se estima a lo largo de la vida útil del producto.

El cálculo generación de contaminantes no se limita al CO₂, sino que se divide en tres grupos: los gases de efecto invernadero (GEI), los compuestos acidificantes del medio y los gases precursores de ozono. Los contaminantes se pueden comparar unos a otros dentro de su mismo grupo. Es decir, se podrá comparar cuán nocivos son para el medio ambiente unos respecto de otros si pertenecen al mismo grupo, pero no si pertenecen a conjuntos distintos. Entre distintos grupos no existe comparación posible debido a que el efecto que producen en el medio es distinto. A fin de comparar los contaminantes por grupos se crea la siguiente Tabla 2-3 que será de utilidad a lo largo del documento [19].

Elementos	Unidad equivalencia	Proporción
CO ₂	CO ₂ -e	1
CH ₄	CO ₂ -e	310
SO _x	equivalentes de ácido/kg	31,25
NO _x	equivalentes de ácido/kg	21,74
CH ₄	COVNM	0,014
CO	COVNM	0,11
COVNM	COVNM	1
NO _x	COVNM	1,22

Tabla 2-3 Equivalencias de contaminantes por grupos [19]

Ahora que ya quedan detallados los principales elementos contaminantes, se definen los que son de aplicación a los motores de combustión interna. En concreto a los motores de dual fuel gas y diésel. Estos motores tienen la propiedad de emitir distintos gases contaminantes en función del régimen de trabajo, los combustibles utilizados y la carga.

Es necesario especificar que, en comparación con el diésel, la combustión del gas es muy rápida y aumenta la presión y la temperatura del motor en gran medida, aunque también es más limpia. No aumentar en exceso la presión y la temperatura en el cilindro alargará la vida útil de la máquina. Por ello es necesario buscar el compromiso entre la óptima combustión, en cuanto a gases liberados y tratar de no aumentar la presión efectiva en gran medida [2].

Según los datos del instalador del sistema dual fuel, la implantación de este sistema sobre un motor diésel arroja unas tasas de reducción de contaminación similares a las descritas en la Tabla 2-4. Si bien, es necesario tener en cuenta que esta reducción dependerá del régimen y carga del motor. Este cálculo está realizado para un motor diésel en su régimen medio y carga media [25].

Elementos	Reducción contaminación
CO ₂	20 %
Hidrocarburos	5 %
SO _x	95 %
NO _x	8 %
Partículas	50 %

Tabla 2-4 Reducción de contaminantes en un motor dual fuel [25]

En los motores dual fuel la emisión de CO, HC y NO_x depende en gran medida de la temperatura a la que se realiza la combustión. Por ejemplo, para la formación de CO y HC se estima una caída acusada en la temperatura del motor durante la reacción señal de una combustión incompleta. Mientras que, por el contrario, cuando la temperatura en la cámara de combustión es alta, se estima que el motor comenzará a emitir mayor cantidad de NO_x [26, 27].

Diversos estudios muestran que usando fuel y metano, las emisiones de NO_x mejoran considerablemente, sin pérdidas apreciables de eficiencia; aunque los niveles de hidrocarburos no quemados y de CO sí aumentarían cuando se trabaja a bajas cargas del motor debido a una mezcla de aire y combustible demasiado pobre [1, 3, 26, 27].

2.4.2 RSC de las Fuerzas Armadas.

Las Fuerzas Armadas reflejan en su archivo “Responsabilidad Social 2010” el compromiso de inversión en el beneficio económico, medio ambiental y social. En él se detalla como prioridad de las Fuerzas Armadas la política de sostenibilidad medio ambiental y el compromiso ante el cambio climático. En cuanto al compromiso ante el cambio climático, se propone lograr un futuro sostenible y que facilite un uso eficaz de los recursos tanto naturales como económicos apoyando así la eficiencia energética y la reducción de emisiones de carbono entre otros [28].

Se cita además en este documento la exención de las Fuerzas Armadas de las limitaciones impuestas en cuanto a emisiones de gases contaminantes. Si bien para el beneficio de la sociedad se resalta el compromiso que asume el Ministerio de Defensa con la adopción de medidas que reduzcan las emisiones y que aumenten la eficiencia energética [28].

2.5 Gas-diésel dual fuel

Este tipo de motores nacen de la idea de reducir las emisiones provenientes de las impurezas existentes en el gasóleo utilizado en los buques. Con esto se pretende conservar la misma planta propulsora o de generación de electricidad existente, y con las modificaciones mecánicas adecuadas (siempre que sean económicamente viables) se reduzcan tanto contaminación como costes de operación. Las transformaciones realizadas serán principalmente aquellas que permitan acoplar el sistema de gas a los motores de gasóleo existentes. Se describe el sistema en la Figura 2-11.

Un motor gas-diésel dual fuel es un motor diésel modificado para operar con los dos tipos de combustible, para lo que se mantiene la inyección del gasóleo y se añade el gas. Aunque son parte del mismo proceso y actúan de manera conjunta, es necesario tener en cuenta sus diferencias.

La combustión del gasóleo es consecuencia del autoencendido característico de éste. Por norma general, en los motores convencionales, el carburante es administrado cuando la temperatura del aire comprimido es mayor a la temperatura de auto-ignición o ignición espontánea, que para el caso del gasóleo se encuentra entre los 210-230 °C. Una vez alcanzada esta temperatura comienza la reacción en cadena desde los puntos donde la combustión es óptima hacia el resto de la mezcla [10].

La ignición del gas en el motor normalmente no se realiza mediante encendido por compresión, sino que se suele utilizar una llama proveniente de una fuente externa. El encendido provocado se puede deber a la generación una chispa, como ocurre en los MEP, o bien, debido a la llama producida por la combustión del diésel, en los MEC. En los combustibles tipo gas o gasolina se hace necesario inducir la deflagración debido a su alto octanaje y alta temperatura de auto ignición [29]. Tratando con de gases puros como el metano y el etano la temperatura de ignición espontánea es de aproximadamente 470-540 °C [6].

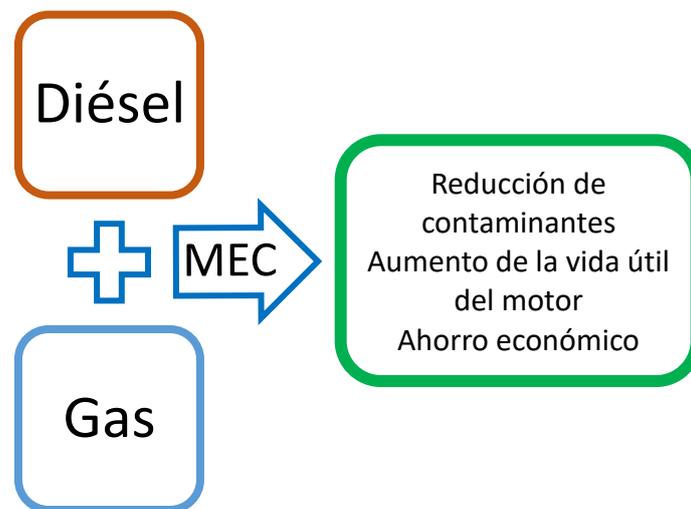


Figura 2-11 Esquema explicativo del sistema dual fuel

El gas actúa como combustible principal, mezclándolo con el aire e inyectando una pequeña parte de diésel. Es este pequeño aporte el que, por su propia ignición, provoca la combustión y actúa como primer eslabón para el encendido del gas. En estos casos se puede llegar a una sustitución de la cantidad de diésel inyectada desde un 80% hasta cerca de un 95% por gas. Aunque también existe la posibilidad de usar el gas como medida de mejora de la combustión. Es decir, utilizar el gas para mejorar la difusión de la mezcla y así completar la combustión del diésel. En definitiva, hacer la combustión más “limpia”. Para esto no harán falta porcentajes mayores de un 30% [26].

En los motores dual fuel, el gas puede ser inyectado directamente en la cámara de combustión o bien mezclado previa entrada del aire, en el colector de admisión. Así quedando definido el modo de operación de estos motores, a grandes rasgos, el documento se centrará en cada uno de los tipos de motores, que se definirán por separado.

2.6 Tipos de motores dual fuel.

En la actualidad, los motores dual fuel más extendidos son los que utilizan inyección directa, indirecta o tobera mezcladora. Es importante conocer de estos motores que la mezcla de gas y aire puede realizarse en la cámara de combustión o entrar en ella como un pre-mezclado de gases [6, 26, 30, 31].



Figura 2-12 Inyección indirecta e inyección directa dual fuel [31]

Por ejemplo, en el caso de los motores de inyección indirecta como los de mezclado se realiza la combinación de combustible (gas) y aire previamente a la entrada en el cilindro, como se aprecia en la Figura 2-12 (Izquierda). Por otra parte, como se también muestra en la Figura 2-12 (Derecha), ambos combustibles son aportados directamente al cilindro cuando se trata de un motor de inyección directa.

2.6.1 Pre-mezcla de gases.

En este tipo de sistemas, la mezcla combustible-aire se realiza antes de entrar a la cámara de combustión.

Tienen la ventaja de ser baratos en la conversión. Esto se debe a que las modificaciones a realizar son bastante comunes, es decir, el material a utilizar está estandarizado y los sistemas necesarios son relativamente sencillos de encontrar. Además, su instalación no supone una gran modificación en ninguna de las partes críticas del motor. Es por esto que es la forma más extendida de conversión de motores diésel a dual-fuel a día de hoy [32].

Cabe destacar que la entrada del fluido al cilindro es más precisa y definida en el tiempo en los sistemas de inyección directa. Aunque esto no es necesariamente un inconveniente en la inyección indirecta, puesto que gracias al proceso que seguirá el conjunto aire-gas se puede considerar que la mezcla es homogénea. Debido a que el gas se mezcla en el exterior del cilindro con el aire, ambos realizan el paso a través de la válvula de admisión y la carrera de admisión del pistón y la de compresión de forma conjunta. Provocan así que se consiga una mezcla que ya se puede considerar homogénea [3, 26].

Por lo tanto, la mezcla de aire-gas se puede estudiar como un único fluido compuesto por distintas proporciones de otros. Las propiedades que afectan a la cámara en general, como la temperatura o la presión, afectarán por igual a todos los fluidos en ella. Del mismo modo ocurrirá cuando varíen las características de los elementos en el cilindro [1].

Puesto que la inyección se realiza previamente a la cámara de combustión, en el conducto de admisión, esta afectará al ajuste de combustible-aire. Es necesario por ello tener en cuenta que el volumen de entrada al cilindro es constante para cada estado del motor. Por ello, la cantidad de gas

inyectado en la admisión restará volumen al aire entrante. Aunque no es una relación muy importante, si es necesario tenerlo en cuenta para realizar cálculos.

Como apunte, es necesario conocer que cualquiera de los motores de este tipo, realiza la combustión de una manera específica dependiendo del momento de inyección del diésel, el cual en este caso de aporte indirecto es uno de los pocos procesos modificables en tiempo y cantidad. Como se demuestra con una serie de experimentos en la investigación realizada en un motor diésel 4T de inyección indirecta, cuando la inyección del combustible diésel se encuentra relativamente avanzada, la combustión comienza de forma lenta y va haciéndose más rápida con el tiempo. De otro lado, la combustión de los gases se encuentra en su punto más rápido cuando el comienzo de la combustión se hace coincidir con el final de la inyección de combustible [26].

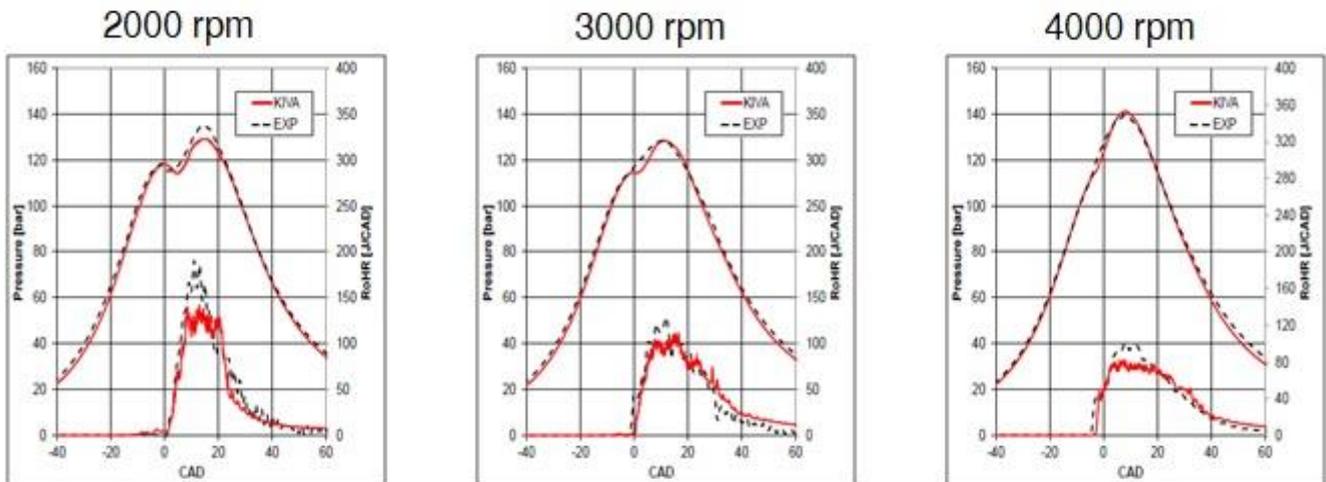


Figura 2-13 Estudio experimental y CFD de un motor. Diagramas $RoHR$ - $Pressure/CAD$ ¹ [1]

Su funcionamiento se describe de forma genérica, tanto por modelos computacionales (CFD KIVA, software computacional de la familia Fortran), como por modelos experimentales, de la forma en que aparece en la Figura 2-13. Aquí se define la forma de liberación de energía por parte de los fluidos de trabajo en este motor, comenzando desde la compresión de la mezcla en el interior del cilindro. Por este motivo se tratará esta etapa como 5 fases diferenciadas: Retardo de ignición del diésel (o piloto), combustión del piloto en la pre-mezcla, retardo de ignición del combustible principal, combustión rápida del combustible principal y combustión por difusión.

1. Retardo de ignición del diésel (piloto).

La primera parte de este proceso se superpone con el final de la etapa de compresión. Comprenderá desde el inicio de la inyección de combustible hasta el Punto Muerto Superior (PMS). El punto de inicio de inyección de combustible variará con la presión del cilindro, la temperatura y la velocidad del mismo, como variables más importantes. Típicamente entre 35° y 10° antes del PMS. Teóricamente, coincidiendo con la llegada del pistón al PMS comienza la inflamación del combustible diésel. A este tiempo desde que el combustible es introducido en la cámara hasta que comienzan las reacciones de encendido se le conoce como retardo de auto-ignición. Es necesario tener en cuenta que en este momento en el cilindro existe menos cantidad de aire que cuando la combustión es en modo sólo diésel, debido al espacio ocupado por el gas en la mezcla. Debido a esta disminución relativa del exceso de aire entrante, es necesario tener en cuenta que existirá una demora mayor en el comienzo de la reacción [29].

¹ $RoHR$ - $Pressure/CAD$: Rate of Heat Release – Pressure / Crankshaft Angle in Degrees (Tasa de calor liberado- Presión / Angulo de cigüeñal en grados)

2. Combustión del piloto en la pre-mezcla.

Comenzada la ignición del diésel, esta se extenderá a partir de este momento de manera rápida. Se caracteriza por comenzar primero con una pequeña llama, que aumenta la presión y la temperatura de forma ligera. Puesto que la cantidad de combustible inyectado es mucho menor que cuando el motor trabaja en modo sólo diésel, estos aumentos son mucho más suaves. Es necesario tener en cuenta, además, para este modelo que la temperatura alcanzada en el cilindro es menor que cuando el ciclo trabajaba únicamente con aire, debido a la diferencia de calor específico entre el gas y el aire. Si se comparan los gases combustibles estudiados con el aire resulta una diferencia cerca de 4 veces mayor en cuanto a calor específico entre los primeros y este último [1, 2].

3. Retardo de ignición del combustible principal.

Al igual que se ha explicado para el diésel, del cual se conoce un tiempo de retardo de auto-ignición, el gas también se caracteriza por esta demora. Puesto que es de la energía liberada por el gas de dónde se aprovechará la mayor parte posible, se hará que la ignición de este combustible aparezca después del PMS [2].

Es conocido que en los motores diésel la combustión se realiza en exceso de aire. Para el caso de que el motor, al ser transformado a dual fuel de inyección indirecta de gas, si el gas mezclado es una cantidad pequeña existirá también exceso de aire. Por su parte, el gas experimenta una menor temperatura de combustión cuanto mayor es el exceso de aire, o dicho de otro modo, cuanto más completa sea la combustión del gas mayor cantidad de energía liberará. Este efecto hace que al comienzo de la llama la temperatura en el cilindro ascienda de manera lenta cuando se trata de combustión en exceso de aire o defecto de gas. Esto a su vez empuja al retardo a alargarse dado que la temperatura comienza a subir muy lentamente [1, 3].

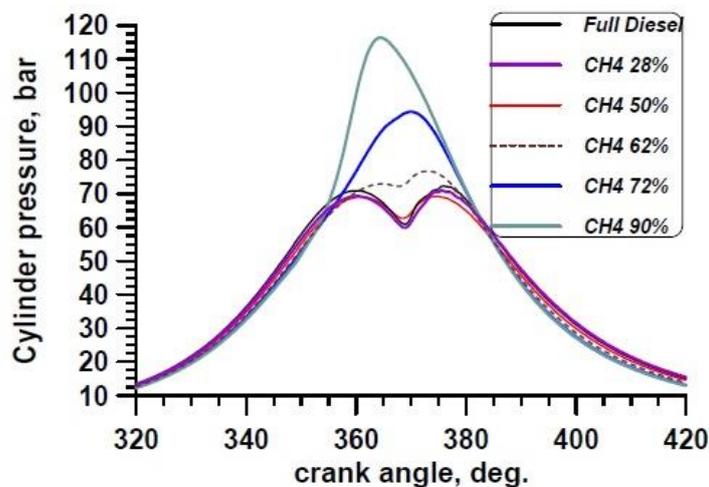


Figura 2-14 Diagrama de combustión de motor dual fuel [1]

Debido a estas reacciones que está sufriendo el gas, además de que el pistón continúa su carrera descendente, la presión disminuye momentáneamente. Es esto por lo que en la gráfica de la Figura 2-14 aparece una discontinuidad. Es por este efecto que se registra una disminución de la presión, puesto que el cilindro comienza a bajar y el gas aún no ha alcanzado su temperatura de auto ignición [33].

4. Combustión rápida del combustible principal.

Tras estos procesos comienza el encendido del combustible principal. Esta ignición es rápida, por lo que la tasa de liberación de calor, así como la presión aumenta bruscamente. Este puede llegar a ser uno de los inconvenientes de este tipo de motores dual fuel si no se controla. Lo cual proviene del hecho de que la combustión de la mezcla es el resultado de la continuación del frente de llama producida por el combustible piloto. Esta parte comienza con la continuación de quemado de diésel, en

el caso de que quedase algún remanente, o bien si se realizase una nueva inyección, además del quemado del gas que lo rodea. Este quemado se extiende hasta que llega a la temperatura de auto-ignición del gas, con la cual se acaba de elevar la presión al máximo [1, 26].

5. Combustión por difusión.

La etapa de combustión finaliza con la denominada combustión por difusión. En esta parte se continúa el encendido de los combustibles restantes de una forma mucho más suave. Serán parte del diésel o del gas que no se quemaron durante la rápida subida de presión. La existencia de esta fase depende principalmente del retraso de combustión del gas presente en la pre-mezcla así como del diésel [29].

2.6.1.1 Mezclador.

Este sistema se compone de una tobera que por succión el gas perpendicularmente a la dirección del aire de admisión (Figura 2-15). Con esto se obtiene una mezcla homogénea, y lo que es más importante, común para todos los cilindros. Siendo su principal inconveniente la distancia a recorrer por el fluido mezclado hasta la válvula de admisión, lo que da lugar a poco control sobre el fluido final entrante en el cilindro. Además de esto, hay que tener en cuenta la posibilidad de variabilidad de la mezcla debido a las dificultades de controlar el gas entrante por el efecto de succión del aire perpendicular [34].



Figura 2-15 Tobera mezcladora de gas y aire [34]

2.6.1.2 Inyección indirecta.

Otra forma de realizar la mezcla sobre el fluido entrante en el cilindro es el uso de inyectores multipunto (Figura 2-16). Estos inyectores se colocan inmediatamente al lado de la válvula de admisión, y se activan electrónicamente permitiendo el paso o cerrándolo, dependiendo de la orden enviada por la centralita (ECU). Esta centralita activa el electroimán que con un émbolo empuja al gas para generar la mezcla, y se detiene cuando es desactivado retornando con un muelle el émbolo y cerrando así el paso del gas [26].

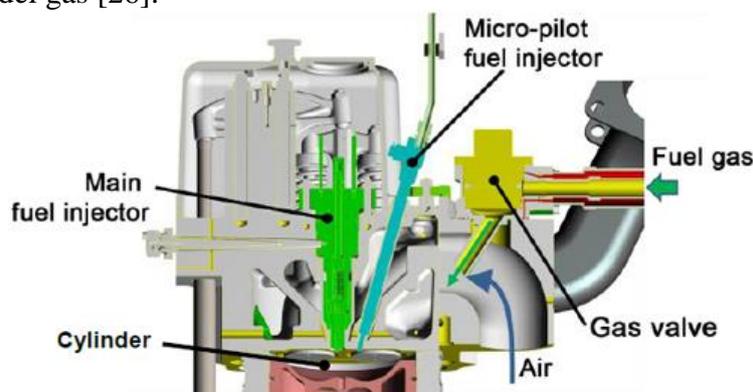


Figura 2-16 Inyección indirecta de gas con llama piloto [35]

2.6.2 Inyección directa.

En los motores de inyección directa la mezcla de combustible primario (gas) y aire se realiza directamente en el cilindro. El gas y el gasóleo son inyectados en el interior del cilindro. Para ello se pueden manejar dos inyectores, separando los combustibles: uno de gas y otro de combustible líquido. Esto es interesante para los fabricantes de motores, porque confiere calidad a la combustión, lo que repercute en bajas emisiones, buen rendimiento y larga duración. Pero también difícil de implementar en motores ya fabricados por la complejidad de instalar un inyector de gas, además del ya existente, y garantizar una buena mezcla y combustión. O bien, existen otro tipo de inyectores duales de gas y gasóleo sobre el mismo cuerpo. Por ejemplo, el inyector de la Figura 2-17, el cual inyecta desde el mismo cuerpo gas o diésel según se programe. Estos inyectores duales tienen la ventaja de poder ser implementados en motores ya fabricados o en diseños previos, ya que la única variación que experimentan estos motores es el cambio del inyector de gasóleo por uno de doble combustible, con lo que se conseguirá transformarlo a dual fuel [36, 37].



Figura 2-17 Inyector directo dual, Westport HPDI 2.0 [36]

Los sistemas utilizados en estos sistemas son más complejos, pero a cambio ofrecen mayor precisión en la combustión así como mayor control de la emisión de gases contaminantes. Actualmente la potencia y par que entregan estos motores de inyección directa se debe principalmente a la combinación de inyección directa, sobrealimentación de comburente y variación del tiempo de apertura y cierre de válvulas. Principalmente la inyección controlada en el tiempo es el parámetro que puede generar una forma de combustión distinta para cada sincronización del inyector [38].

2.7 Variaciones del motor dual fuel.

Los elementos auxiliares y las modificaciones que se deben realizar sobre un motor diésel para realizar su transformación a dual fuel son principalmente [6]:

- Depósito de almacenamiento de gas. Se puede tratar de uno o varios depósitos, adaptándose así mejor al espacio disponible. Además estos depósitos pueden contener el gas comprimido o licuado, cada uno con sus respectivas ventajas.
- Electroválvulas. Encargadas de gestionar y regular el paso de gas hacia el conjunto. Son además un elemento de seguridad encargado de cerrar el paso en caso necesario.
- Boca de carga. Realiza la conexión segura entre el usuario y quien entrega el combustible. Se encuentra estandarizada para cada tipo de combustible.
- Líneas de gas. A través de estas líneas se transporta el combustible de la carga hasta el depósito y desde el depósito hasta el motor. Entre el depósito y el motor la línea pasa a través del reductor o vaporizador según proceda. Si estamos tratando con un circuito de gas comprimido la línea será distinta que si el circuito es de gas licuado. Para el gas licuado,

puesto que la temperatura es muy baja se dispone una tecnología especial para mantenerla. Cuando la línea transporta gas a alta presión, la línea será específica para este cometido.

- Reductor / Gasificador. Si el gas se almacena comprimido se utilizará un reductor de presión para disminuir la presión de salida del cilindro, de los 200 bar ó 8 bar (GNC o GLP) que suele trabajar entre 1,5 y 2 bar para la inyección en el motor. Cuando se trata de un gas licuado antes de inyectarlo en el motor hay que vaporizarlo y calentarlo. Para este cometido se emplea un vaporizador.
- Inyectores. De gas pueden ser de diversos tipos, como aparecen detallados en los puntos: 2.6.1.1, 2.6.1.2 y 2.6.2. En ellos se explican los mezcladores y los inyectores, tanto los indirectos como los directos, por este orden.
- Centralita (ECU). Elemento electrónico Se conectará a los inyectores, la centralita original del motor y los sensores de los que pueda obtener información así como al conmutador. Todos los sensores transmiten información a este elemento que la procesa e intenta mejorar la combustión ajustando los parámetros sobre los que puede actuar. Cuando llega a su punto óptimo sólo comprueba los parámetros sin modificarlos más.
- Conmutador. Este elemento permite al usuario el cambio de modo de funcionamiento. El usuario normalmente podrá elegir entre modo sólo diésel, dual fuel óptimo y a veces se incluyen modos personalizados. De aquí parte la orden a la centralita para hacer el cambio. Además, en el propio conmutador se suelen mostrar parámetros útiles para el usuario. Como, por ejemplo, la cantidad de combustible remanente.

2.8 Combustibles y su almacenamiento.

2.8.1 Gas Natural.

Según cita el Ministerio de energía en su página web [7] el gas natural “*consiste en una mezcla de gases, en proporciones variables, pero donde el metano constituye el elemento principal con un alto porcentaje. También contiene pequeñas cantidades de otros hidrocarburos y de gases no hidrocarburos y su composición viene establecida en España por la Resolución de 22 de septiembre de 2011 de Dirección General de Política Energética y Minas. Entre las características del gas natural destacan la ausencia de toxicidad y su menor densidad respecto al aire*” [39].

Este gas, combustible, se obtiene de la degradación de materia orgánica. Su composición es principalmente metano, que se genera debido a la descomposición por fermentación gracias a las bacterias. Normalmente se “*extrae de formaciones que pueden hallarse encima de yacimientos petrolíferos o en reservas independientes y aisladas de otras materias primas*” [7].

El gas introducido al sistema gasista debe cumplir las especificaciones que se reflejan en el BOE-A-2011-15496. Ver Tabla 2-5.

Propiedad	Unidad	Mínimo	Máximo
PCS	kWh/m ³	10,26	13,26
Densidad relativa	m ³ /m ³	0,555	0,700
S Total	mg/m ³	–	50
Polvo / Partículas	–	Técnicamente puro	

Tabla 2-5 Especificaciones a cumplir por el gas natural [39]

En su composición se destaca el bajo número de azufre presente en el combustible, lo cual favorece su utilización frente a combustibles como el gasóleo por su contenido en este elemento [32].

Actualmente se ha iniciado el estudio acerca de un nuevo proyecto que asegurará la interconexión con el resto de países europeos a través de Francia en el Pirineo oriental. El proyecto ha sido bautizado como STEP (*South Transit East Pyrenees*) [42, 43].

2.8.1.1 Almacenamiento.

En el entorno marítimo la autonomía es un factor de suma importancia. Esto también repercute en los combustibles. En previsión de cualquier cambio de situación planeada siempre es recomendable contar con una reserva de combustible.

Para este caso en que se va a transformar un motor a dual-fuel, es necesario tener en cuenta que el combustible indispensable es el diésel. Esto es debido a que el diésel es el único combustible cuando se trata de operación en modo sólo diésel, además de ser indispensable para la operación en modo dual fuel, para el encendido del gas. Se priorizará este combustible sobre el gas, en caso de falta de espacio, y no tendrá sentido almacenar más gas del que se pueda utilizar con el diésel en modo combinado.

Debido a que los tanques de almacenamiento de diésel ya están construidos a bordo de los buques a estudiar, el estudio del almacenamiento se realizará sobre los combustibles gaseosos.

Para el almacenamiento del gas a bordo existen varios tipos de tanques en el mercado. Entre ellas destacan de una parte la compresión del gas, o bien de otra parte, el enfriamiento del mismo, que condensa el gas volviéndolo mucho menos denso.

2.8.1.1.1 Compresión.

Para el almacenamiento del gas natural en forma comprimida se utilizan tanques de diversos materiales. Su clasificación depende de estos materiales de fabricación. Esto es que el GNC puede ser almacenado en tanques de los siguientes tipos:

1. Cilindros de metal, acero o aluminio.
2. Cilindros de metal, acero o aluminio reforzados en la parte cilíndrica con fibras de vidrio o carbón.
3. Cilindros de metal, acero o aluminio reforzados completamente de fibras de vidrio o carbón.
4. De plástico reforzado de fibras de vidrio o carbón.

Estos tanques permiten almacenar el gas a temperatura ambiente pero a una presión mayor. Generalmente tarados a 200 bar, aunque pueden llegar a soportar cargas de 250 bar. A presión de 200 bar y a temperatura ambiente, la densidad del combustible es $158,49 \text{ kg/m}^3$. Cabe resaltar que el gas natural no se comporta como un gas ideal. Si bien se pueden realizar aproximaciones bastante exactas utilizando el factor de compresibilidad. Para este caso, este factor “Z” será de 0,93 [3, 7, 32].

Cuando se realiza una instalación de este tipo se prevé la adopción de un sistema con los siguientes elementos:

- Rack de tanques de gas: Puesto que el gas se va a almacenar en tanques presurizados y que estos por lo general se construyen para vehículos que van a recorrer distancias no muy extensas, estos tanques se proyectan mucho menores de lo que sería necesario para un barco. Como ya se ha mencionado anteriormente esto no es problema, dado que la solución más simple es, muchas veces, la conexión de ellos creando una única línea conjunta. Para ello se conectan todos los tanques entre sí y al regulador de presión.
- Regulador de presión: Disminuye la presión previamente a la inserción del gas en el conducto de inyección. Por lo general se suele disminuir de 200 bar a 5 aproximadamente, dependiendo del modelo y del uso que se le dará.
- Filtrado: Para evitar el posible paso de partículas indeseadas que puedan dañar cualquier equipo del circuito se filtran los gases que se van a inyectar.

2.8.1.1.2 Condensación.

En cuanto a los tanques de almacenamiento de gas natural, se pueden utilizar tanques de gas natural licuado (GNL). El gas natural ha de ser enfriado para pasar a estado líquido. La temperatura de cambio de fase es $-161\text{ }^{\circ}\text{C}$ para 1 atm. En este estado su densidad disminuye unas 580 veces. Pasa de $0,743\text{ kg/m}^3$ a 431 kg/m^3 [6, 7].

Para el almacenamiento y trasiego del combustible se necesitan tanques de almacenamiento para GNL, la línea de carga y un gasificador de GNL y el circuito de gas de vaporizado.

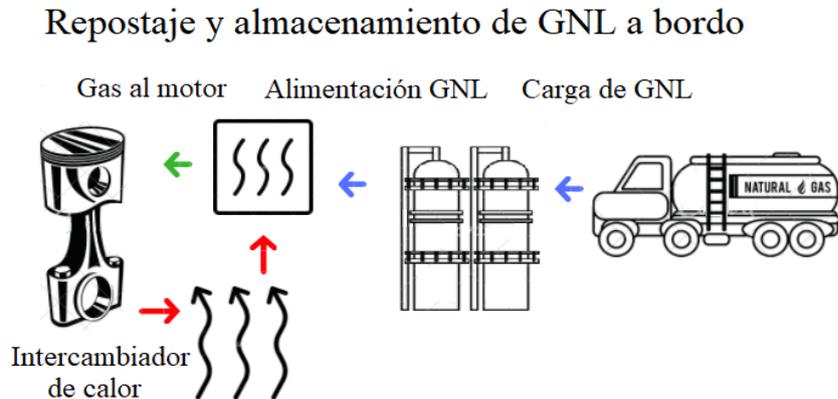


Figura 2-19 Diagrama de planta GNL a bordo de buque

- **Tanques de almacenamiento:** Compuestos por dos tanques de acero inoxidable concéntricos. El tanque interior actúa como recipiente. Este recipiente soporta el líquido en su interior y lo mantiene a la temperatura adecuada para evitar la vaporización prematura del gas. El segundo tanque, exterior a este y estanco, recubre el primero. Entre ellos existe un espacio en el que se ha realizado el vacío de aire para evitar así la transmisión de calor hacia el interior. En muchos casos se incluye un sistema intermedio a los dos tanques. Pueden ser recubrimientos de perlita o bien lo que se conoce como MLI (*Multi-Layer Insulation*). Estos sistemas tienen la función de establecer más capas con las que proteger el líquido en mayor medida del calentamiento por transmisión del exterior [44].
- **Gasificador de GNL:** Este sistema consiste de una serie de intercambiadores de calor que aumentan la temperatura del gas. Este aumento de temperatura hace que el gas natural cambie de fase. El gas en estado líquido a $-165/-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ pasa a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en estado gaseoso. Se utilizan normalmente vaporizadores que operan con el propio aceite lubricante del motor, con agua del mar o si estos no son suficientes se pueden utilizar resistencias eléctricas. Generalmente se utiliza un intercambiador intermedio entre el fluido que aporta calor y el que lo recibe. En este caso se establece un circuito de agua glicolada para que en primera instancia se caliente este fluido. Posteriormente mediante otro intercambio se calienta el gas hasta la temperatura necesaria.
- **Línea de carga y regasificación del GNL:** Estas líneas se utilizan para el trasiego del gas en estado líquido desde la unidad de transporte al tanque de GNL. También parten del tanque y transportan el líquido hasta la estación de gasificación del GNL. Están formadas, al igual que los tanques, por dos líneas concéntricas de acero inoxidable aisladas entre sí. Además poseen recubrimientos especiales para evitar la transferencia de calor y existe un vacío entre las dos líneas concéntricas. Con esto se consigue evitar la formación de escarchas sobre la línea exterior que podrían dañarla y asimismo el gas licuado se transporta a la temperatura necesaria hasta su destino. Esta tubería es conocida en el mercado como MVIP (*Modular Vacuum Insulated Pipe*) y tiene la forma que se muestra en la Figura 2-20.

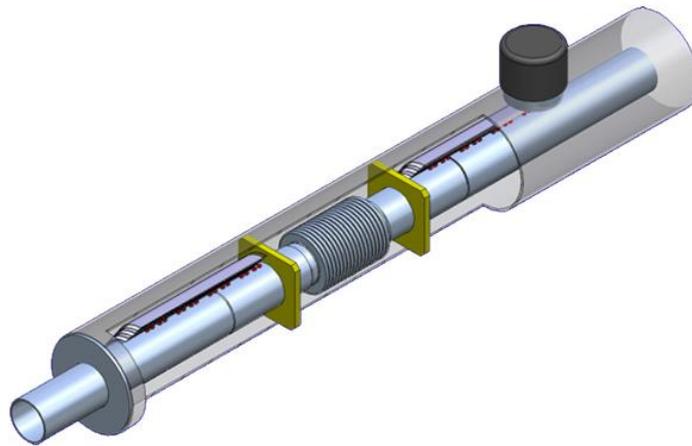


Figura 2-20 Tubería MVIP [45]

- Línea de alimentación al motor principal: A través de una línea de tuberías de acero se transporta el gas desde el vaporizador a la bomba que dará presión al circuito de inyectores más adelante. Sería conveniente filtrar el gas para evitar partículas indeseadas en el resto del circuito y así asegurar todos los componentes.

En este caso cabe destacar también el efecto conocido como *Boil-Off Gas*. Este efecto es producido por la imposibilidad de mantener el gas licuado completamente aislado del exterior. Pese a las protecciones utilizadas, en la práctica es muy difícil que la energía no sea transferida del exterior al interior del tanque. Esta transferencia de energía es suficiente como para que una pequeña cantidad de gas cambie de estado cada cierto tiempo. Este gas vaporizado como consecuencia de un proceso indeseado se conoce normalmente como *Boil-Off Gas*. A menudo la generación de este gas es una mera curiosidad, puesto que los equipos de a bordo, aun estando en puerto son capaces, por lo general, de consumir incluso más gas que el generado por este efecto. Si no se diese el caso, se haría necesaria la instalación de un quemador de gases o de un relicuador [46].

2.8.2 Gas Licuado de Petróleo.

Se denomina Gas Licuado de Petróleo (GLP) a la mezcla de propano (C_3H_8) y butano (C_4H_{10}). Estos componentes son gaseosos cuando se encuentran a temperatura y presión atmosférica. Puesto que son inodoros, por seguridad, se posibilita su detección en caso de fuga añadiendo un compuesto odorante. A diferencia del gas natural este compuesto es más pesado que el aire, es por ello que se mantiene sobre la superficie en caso de estar libre. El compuesto en sí no es nocivo para la salud de las personas, pero sí que puede llegar a provocar asfixia si la cantidad liberada es tal que desplaza el aire a su alrededor e impide la inhalación de aire. Proviene principalmente de refinado de petróleo o del crudo y gas natural [8].

El GLP a presión atmosférica y temperatura ambiente (20 °C) se encuentra en estado gaseoso. Al disminuir la temperatura, el butano se condensará a -0.5 °C, mientras que el propano lo hará a -42.2 °C. De otra manera, si se aumenta la presión a temperatura ambiente se obtendrá líquido a partir de 2 atmósferas para el butano y 8 para el propano. Esta propiedad facilita su almacenamiento, puesto que condensar el gas significa una reducción de 250 veces en volumen aproximadamente. El Ministerio de Energía cita las propiedades que se describen en la Tabla 2-7 [8].

Compuesto	Poder Calorífico Superior	Poder Calorífico Inferior
Butano comercial	11867 Kcal/Kg	10938 Kcal/Kg
Propano comercial	12052 Kcal/Kg	11082 Kcal/Kg

Tabla 2-7 Poder calorífico del GLP [8]

2.8.2.1 Almacenamiento.

Al igual que ocurre con el gas natural, el gas licuado de petróleo se almacena en tanques específicos. En este caso los tanques por lo general contienen el GLP en estado líquido.

2.8.2.1.1 Condensación.

Los tanques usados para almacenar el GLP se mantienen a temperatura ambiente y a una presión generalmente de unos 8 bar. Están preparados para soportar incluso 30 bar. En estas condiciones el gas se encuentra en fase líquida. Esto es muy positivo por la disminución de volumen que supone.

- Tanque de gas: Almacena el combustible en forma líquida previamente a su uso. Para almacenar este combustible los tanques se fabrican en aluminio, acero o composite.
- Líneas de GLP de alta presión: Transportan el gas en estado líquido a la estación reductora.
- Reductor / Vaporizador: Transforma el GLP de estado líquido a gas reduciendo la presión a 2,5 / 1,5 bar aproximadamente para su uso posterior en la inyección.
- Líneas de GLP de baja presión: Transportan el gas en estado gas a la entrada de los inyectores.

2.9 Normativa y emisiones.

2.9.1 Acuerdos y normativa de almacenamiento de gases.

La normativa de almacenamiento de gases y combustibles de baja temperatura de ignición se rige por la norma MSC 391 (95) impuesta por la Organización Marítima Internacional (IMO por sus siglas en inglés). Esta norma parte de la unificación de todas las normas previas para una normalización de la legislación. Esta norma fue adoptada el día 11 de Junio del 2015 y aprobada para su entrada en vigor a partir del 1 de Enero del 2017. Se aplicará a buques cuyo contrato de construcción no haya sido firmado después de la fecha de entrada en vigor, además de los que en la fecha de entrada en vigor no hayan comenzado con la puesta de quilla o bien los contratos para buques que se vayan a realizar después de 2021.

En general, los combustibles en sus almacenamientos o en sus conexiones, en caso de fugas no pondrán en peligro al buque, las personas o al medio ambiente. Estos se mantendrán siempre entre los valores de temperatura y presión marcados en su proyección. Contarán con un sistema de contención de combustible que actuará detectada una pérdida de gas. Los tanques portátiles a todos efectos tendrán las mismas consideraciones que las instalaciones fijas.

En cuanto al gas natural en estado líquido, su máxima presión de almacenamiento será de 10 bar. Para ello dispondrá de una válvula de alivio tarada a esta presión máxima. La presión máxima de servicio nunca debe superar el 90% del valor de proyecto, para esto se instala la válvula de alivio. Las válvulas de alivio deben estar duplicadas para poder prescindir de alguna de ellas en caso de avería. Además, para evitar la exposición de la cubierta sobre la que descansan los tanques, estos deben estar provistos de una bandeja de goteo, para contener posibles fugas. Si estuviesen en un espacio cerrado las paredes serán herméticas al gas.

Los tanques de gas natural comprimido habrán de ser aprobados por la propia IMO. Además poseerán válvulas de descarga a presión tarada inferior a la de proyecto. Se proveerán medios adecuados para que, en caso de declaración de incendio a bordo, el tanque pueda ser despresurizado. Por lo general, el almacenamiento de gas natural comprimido no se hará en espacios confinados. En casos excepcionales, y tras un examen y aprobación especial por parte de la IMO, podrá ser implementado cuando cumplan una serie de requisitos especiales.

3 APLICACIÓN PRÁCTICA.

El estudio de aplicación práctica a su vez se subdivide en cuatro apartados: Viabilidad técnica, viabilidad económica, viabilidad financiera y viabilidad comercial. Cada uno de estos apartados no se entiende sin el anterior, es decir, al llegar a un punto muerto en cualquiera de los apartados el proyecto se debe desechar.

Así se plantean los cuatro apartados que se seguirán en la aplicación a la Armada con el objetivo de analizar la viabilidad de aplicar el sistema dual fuel.

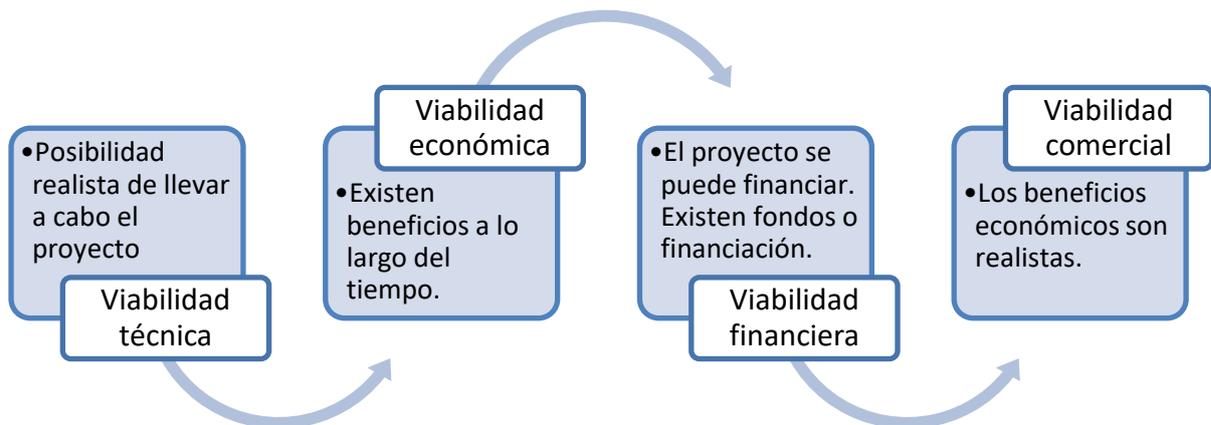


Figura 3-1 Desarrollo de un análisis de viabilidad genérico

3.1 Propuesta de conversión.

3.1.1 Características previas de las plataformas.

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es el estudio de la implantación del sistema dual fuel sobre motores diésel de la Armada. La primera parte consiste en el estudio de viabilidad técnica. En él se determina la posibilidad de implantar o no el sistema desde un punto de vista técnico.

Para ello es necesario conocer dichas plataformas y sus características. Se explican las modificaciones para distintos escenarios, con lo que las mejoras se plantean sobre motores con distintas soluciones. Estas dos plataformas son el patrullero P28 “Tabarca”, así como las lanchas de instrucción A121 – A124. Cualquiera que se escoja tendrá sus peculiaridades debidas al momento y la coyuntura temporal, además de sus cometidos, que no son los mismos para ambos. Es por esto que las soluciones son propias para cada unidad.

3.1.1.1 Patrullero P 28 “Tabarca”.

Este patrullero perteneciente a la clase “Anaga” fue concebido junto a otras 9 unidades construidas por la Empresa Nacional Bazán (actual Navantia). Su botadura tuvo lugar el 23 de diciembre de 1980, para ser entregado a la Armada el día 31 de diciembre de 1981. Es el octavo buque de su serie, de la que actualmente quedan cuatro unidades en activo. Su cometido principal es la vigilancia del entorno marítimo costero, caladeros de pesca y Zona Económica Exclusiva así como la colaboración con la Escuela Naval Militar para adiestramiento de los alumnos. Por ello participa en operaciones reales y ejercicios.

Esta unidad es impulsada por un motor “BAZÁN MTU 16V 956 TB91”. Con las siguientes características:

- Desarrolla 3356 kW (4500 CV) a 1500 rpm.
- Motor de cuatro tiempos.
- 152,8 l de cilindrada total o 9,56 l por cilindro.
- 16 cilindros en V con ángulo de 50° con 64 válvulas.
- Orden de encendido: A1-B3-A3-B7-A7-B4-A4-B8-A8-B6-A5-B2-A2-B5-A5-B1 según la Figura 3-2.

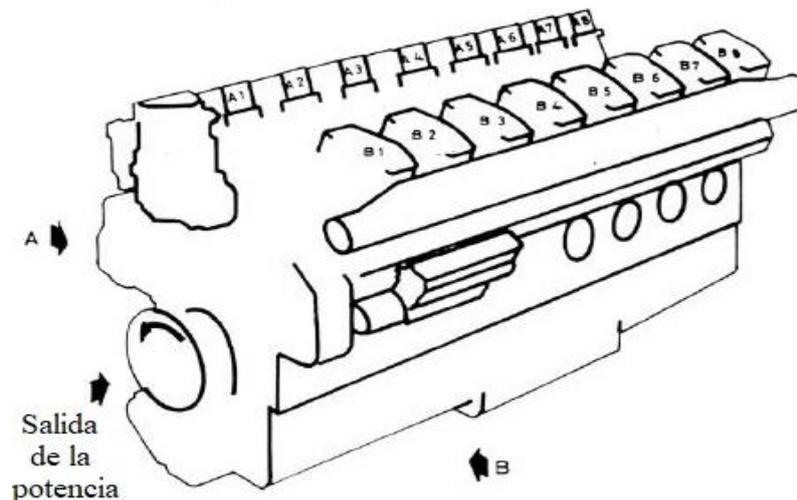


Figura 3-2 Esquema del motor Bazán MTU 16V 956 TB91 [47]

- Relación de compresión de 13:1.
- Sobrealimentado por turbocompresor reaprovechando los gases de escape.
- *Intercooler* de agua sin tratar/ agua de mar.
- Cuenta con sistema de inyección directa.
- Rotación a izquierdas o sentido anti horario (desde el lado de salida de la fuerza).
- Peso de 11300 kg.
- Relación potencia máxima / peso 0.4 CV/kg.
- Régimen de revoluciones 600 a 1500 rpm
- Refrigerado por agua dulce glicolada.
- Arranque con aire a presión 3 MPa mínimo.
- Aire comprimido para arranque inyectado únicamente en el lado “B” del motor.
- De estructura cuadrada con 230 mm de carrera de pistón y 230 mm de diámetro.
- Distribución de apertura y cierre de válvulas (Figura 3-3):
 - Avance de Apertura de Admisión: 32° antes del PMS.
 - Retraso de Cierre de Admisión: 56° después del PMI.
 - Avance de Apertura de Escape: 79° antes del PMI.

- Retraso de Cierre de Escape: 29° después del PMS.
- Fin de inyección de combustible: 24° antes del PMS.

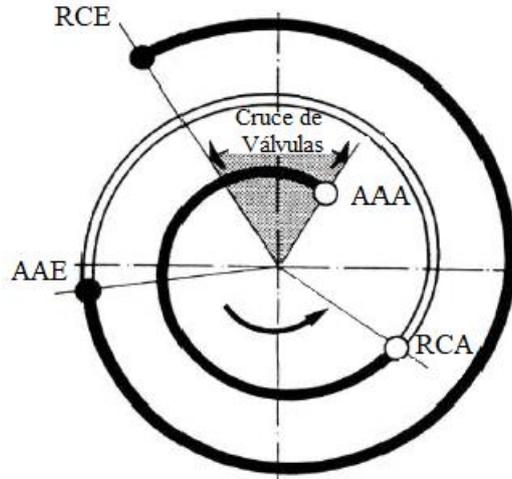


Figura 3-3 Diagrama de apertura y cierre de válvulas [48]

1. Alimentación y escape

Se realiza la alimentación a través de dos válvulas por cada culata y cilindro. El motor es sobrealimentado por dos turbocompresores como el de la Figura 3-4. Uno para los cilindros A y B del 1 al 4 y otro para los cilindros A y B del 5 al 8. Cada salida del turbocompresor posee su propio enfriador de gases de admisión.

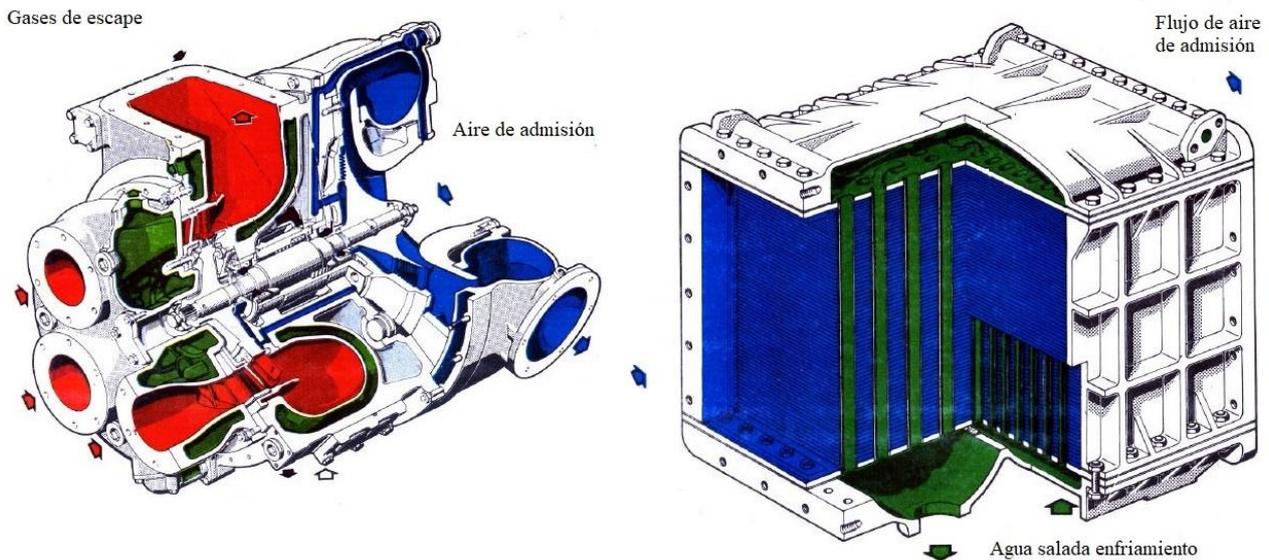


Figura 3-4 Corte de turbocompresor y enfriador del motor Bazán MTU 16V 956 TB91 [47]

Cada uno de estos dos turbocompresores es accionado por los gases de escape los cilindros que alimenta. En cada cilindro existen dos válvulas de escape de gases.

a. Sobrealimentación.

La sobrealimentación se basa en la idea de aumentar la cantidad de comburente entrante en el cilindro por cada ciclo. Esto se realiza debido al incremento de presión proporcionado por el elemento de sobrealimentación. Una mayor presión deriva en un aumento de la densidad del aire de admisión [9, 10, 11].

En un principio el gasto de aire se debe incrementar proporcionalmente al del combustible. Así si se aumentan ambos, manteniendo el resto de características de motor, se concluye que manteniendo la eficiencia se aumenta la potencia.

El primer sistema eficiente de estas características se sitúa en 1905. Fue proyectado por Alfred Büchi. Este ingeniero propuso la idea de utilizar los gases de escape para mover una turbina, la cual, mediante un eje, impulsaría un turbocompresor axial. Este turbocompresor aumentaría la presión del aire entrante. Al inicio esta tecnología no tuvo gran trascendencia puesto que la idea de Büchi era acoplar los dos elementos al mismo eje del motor. Cuando ya propuso una modificación en que la turbina y el turbocompresor giraban solidarios pero independientes al motor se produjo la expansión del sistema, con gran aceptación en el campo aeronáutico [10].

En la actualidad se utilizan los gases de escape del motor para, mediante una turbina que recibe este trabajo, impulsar el turbocompresor, el cual aumenta la presión de los gases de entrada. Ver Figura 3-4.

b. Enfriamiento.

Se sabe que al comprimir adiabáticamente un fluido su temperatura aumentará. Si el aire de salida del turbocompresor es directamente introducido al motor la temperatura será muy alta. Se estiman temperaturas de entrada al motor mayores de 100 °C alcanzando los 200 °C. Esto repercute en un menor rendimiento en comparación con el mismo aire a menor temperatura [9, 10, 11].

Es por ello que se introducen intercambiadores de calor para disminuir esta temperatura de entrada de los gases. En el ámbito naval estos intercambiadores son del tipo líquido-gas optando por tomar agua del mar para refrigerar el aire de admisión. Se colocan tras el turbocompresor de aire de admisión y antes de la entrada al motor. Ver Figura 3-4.

2. Inyección del combustible.

Se realiza mediante dos bombas de inyección lineal, una para cada línea de cilindros. Estas introducen al cilindro la cantidad de combustible necesaria en el momento preciso de acuerdo con la carga. Ambas son movidas por el cigüeñal, el cual las acciona mediante dos ruedas intermedias.

Estas bombas son controladas a través de un regulador centrífugo. Este regulador fija el régimen del motor mediante la señal de aire comprimido que proviene del telemando en el puente actuando sobre el dosificador, que regula la cantidad de combustible entrante en el cilindro (Véase la Figura 3-5).

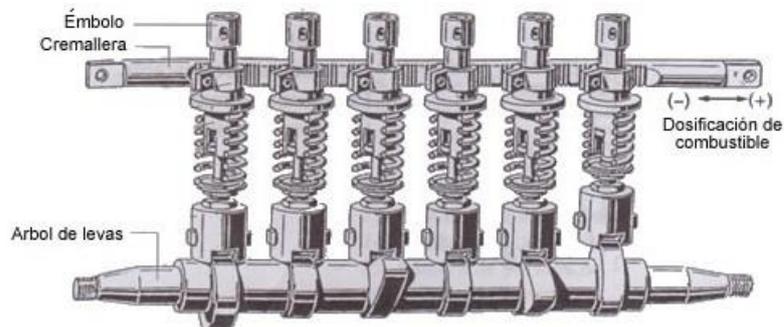


Figura 3-5 Sistema de inyección, bomba de inyección lineal [49]

La regulación no se puede variar de la que proviene de fábrica para añadir el modo dual fuel. Esto se debe a que el ajuste en los cambios de revoluciones ha de ser muy preciso para no dañar el motor con aumentos de presión o temperatura muy bruscos.

Teniendo en cuenta esto se hace necesario cambiar el sistema de inyección completo. Realizar el cambio del sistema de inyección es viable, se propone, por ejemplo, introducir un sistema de “*common-rail*” (como el descrito en la Figura 2-6) debido a su sencillez y prestaciones.

3.1.1.2 Lanchas de instrucción A121-A124.

Las lanchas de instrucción son 4 unidades de la Armada Española con puerto base en la Escuela Naval Militar (ENM). Estos cuatro buques sirven a la Escuela Naval Militar como introducción al medio marítimo a los futuros oficiales de la Armada. Estas unidades forman parte del aprendizaje de los alumnos. A bordo de ellas se realizan ejercicios y prácticas que refuerzan lo aprendido en teoría.

Las lanchas de instrucción fueron construidas en los astilleros Rodman entre 2006 y 2008. Pertenecen a la serie Rodman 66 que Rodman clasifica como “Patrulleras costeras”. Tienen una eslora máxima de 20,5 m, su manga es de 4,9 m. El calado máximo en rosca es de 0,9 m y tiene 2,56m de puntal. Su dotación puede ser de 16 personas para el adiestramiento de los alumnos. Aunque alcanzan a ser operadas con un mínimo de cuatro tripulantes. Son propulsadas por dos motores principales y dos ejes independientes. Fueron fabricadas en Poliéster Reforzado en Fibra de Vidrio con casco en forma de “V”. Desplazan 29,5 Tm [50].

Estas unidades incorporan dos motores de inyección directa de la casa Caterpillar. El modelo es el Caterpillar C18 Recreativo, pertenecen a la serie que aparece en la Figura 3-6. Este modelo cumple los requisitos Tier II con las siguientes características.

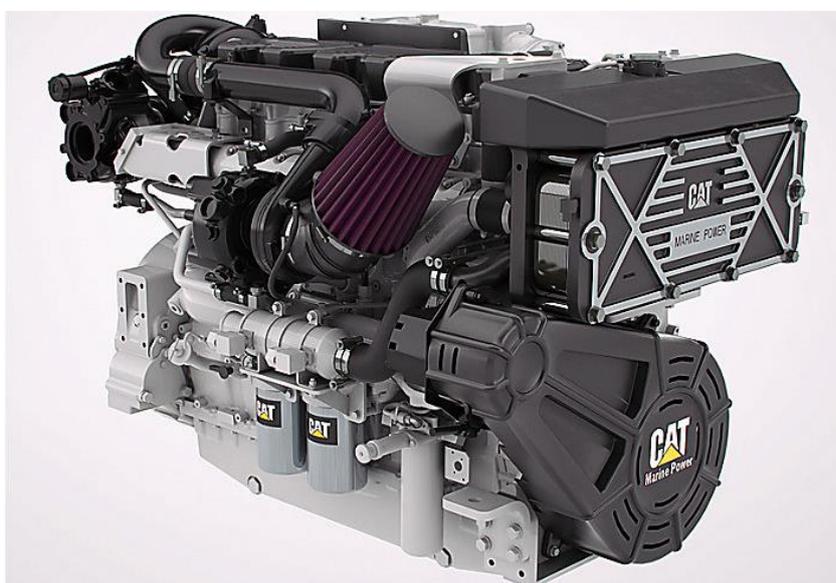


Figura 3-6 Motor Caterpillar C18 Recreativo [51]

- Desarrolla 747 kW (1001 CV) a 2300 rpm.
- Motor de cuatro tiempos.
- 18,1 l de cilindrada total o 3,02 l por cilindro.
- 6 cilindros en línea con 24 válvulas.
- Orden de encendido 1-5-3-6-2-4.
- Relación de compresión de 16:1.
- Sobrealimentado por turbocompresor.
- Posenfriador de agua sin tratar/ agua de mar.
- Inyección directa con control electrónico.
- Rotación a izquierdas o sentido anti horario (desde el lado de salida de la fuerza).
- Peso de 1860 kg.
- Relación potencia máxima / peso 0,538 CV/kg.
- Régimen de revoluciones: 600 a 2300 rpm.
- Refrigerado por agua dulce glicolada.
- Arranque con motor eléctrico a 24 V.
- Motor alargado 145 mm diámetro y 183 mm de carrera.

1. Sobrealimentación

Este motor es sobrealimentado por un turbocompresor. Este turbocompresor es alimentado por los gases de escape de la máquina. Previamente a la entrada el aire es enfriado en el *intercooler*.

2. Control

El control de los actuadores en los motores se hace a través de Módulos de Control Electrónico (ECM). En este caso incorporan la tecnología ADEM 4 (*Advanced diésel Engine Management*). Con este control se optimiza la entrega de combustible al motor. El refinamiento de la tecnología de inyección diésel con el ADEM 4 permite optimizar el consumo a la par que se reducen emisiones y se entrega la respuesta versátil que exigen los usuarios. Esto se realiza a gracias a la precisión de inyección que entrega este sistema, capaz de inyectar varias veces en un solo ciclo.

3. Inyección

La inyección en este motor se realiza mediante seis inyector bomba como el que se muestra en la Figura 3-7. Cada uno de estos inyectores se encarga de suministrar el combustible a uno de los cilindros.

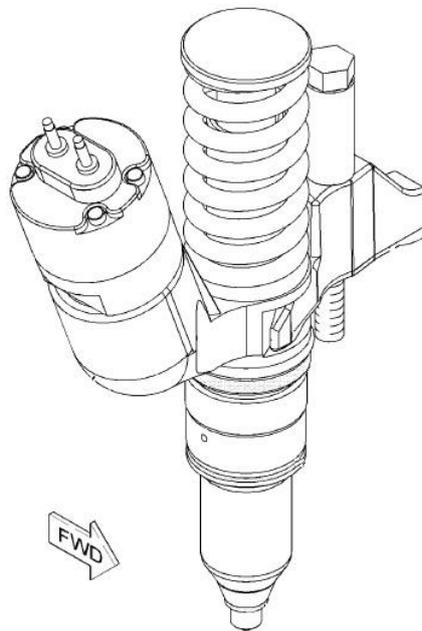


Figura 3-7 Inyector bomba MCEU, Caterpillar C18 [52]

El sistema se compone de tres partes; el inyector, la bomba y la parte electromagnética.

El inyector bomba tiene la ventaja de que la presión no sufre pérdidas debidas al transporte del fluido. Esto se debe a que el inyector es inmediatamente adyacente a la bomba de presión. Es por esto que se consiguen altas presiones en la inyección lo cual favorece la penetración del combustible en el cilindro así como la difusión del mismo. Además posee las ventajas de ser un sistema gestionado electrónicamente, lo que facilita realizar una serie de inyecciones en una misma combustión. Por contrapartida, el inyector bomba requiere de gran cantidad de elementos sobre la culata del motor, lo que la hará más compleja.

Su funcionamiento se basa en que la presión utilizada para el aporte de combustible se genera en la bomba, sobre el propio inyector. Esto elimina conductos intermedios y pérdidas por transporte del fluido. Esto se consigue siguiendo el siguiente esquema de funcionamiento.

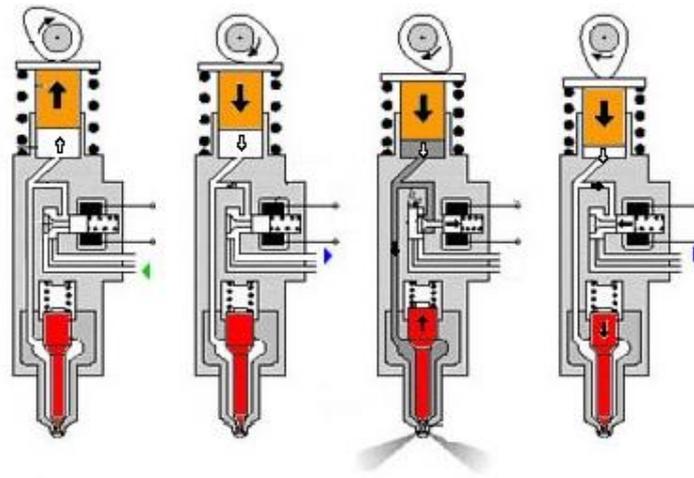


Figura 3-8 Funcionamiento del inyector bomba.

- Comienza el ciclo cuando la cresta de la leva se encuentra pasada. En este punto el muelle del émbolo empuja al pistón a volver a su posición más elevada. El combustible fluye, gracias al empuje de la bomba de alimentación y la succión del émbolo forzado por el muelle, a través de la electroválvula hasta llenar la cámara del émbolo. Aquí se mantiene el combustible hasta que la leva vuelve a impulsar el pistón con su resalte.
- En el momento en que la leva comienza a mover el émbolo hacia abajo el combustible es impulsado hacia el cuerpo del inyector y la electroválvula. Puesto que esta última continúa abierta y que la aguja del inyector está cerrada por medio de un muelle, el combustible regresa por la electroválvula hacia el canal de retorno.
- Este esquema se mantiene hasta el momento de la inyección. Cuando la Unidad de Control Electrónico (ECU) manda la señal la electroválvula se cierra. El émbolo continúa su carrera descendente, lo que causa un aumento de presión. Este aumento de presión continúa hasta el instante en que sea mayor la fuerza ejercida por el fluido que la que ejerce el muelle sobre la aguja del inyector. La aguja se levantará en este momento para dejar pasar el combustible por los orificios del inyector. El combustible se pulveriza con este paso. La inyección continúa hasta que cesa la señal enviada por la ECU.
- Cuando la indicación enviada por la ECU finaliza, la electroválvula vuelve a dejar pasar el combustible hacia el retorno. Puesto que la presión disminuye, fruto de la apertura del retorno, la aguja vuelve a su posición de asiento impulsada por el muelle. El combustible es empujado por el émbolo hasta que este finaliza su recorrido coincidiendo este punto con la cresta de la leva.

3.2 Estudio de viabilidad técnica.

Como se ha planteado previamente, aunque puede ser viable la modificación del patrullero P-28 “Tabarca”, presenta una serie de problemas que es necesario tener en cuenta.

- Es necesario introducir un nuevo sistema de inyección. Se propone un sistema “*common-rail*”. Aunque es necesario tener en cuenta que, en conjunto con las modificaciones propias del sistema dual fuel, se encarecería mucho el presupuesto total de modificación. Ello haría que la viabilidad económica se viese comprometida.
- Es un buque con muchas horas de uso y prácticamente al final de su ciclo de vida. Esto queda demostrado con la baja de siete de los diez patrulleros de su serie. Además, es necesario tener en cuenta que este sistema ofrece beneficios en función de las horas navegadas, lo cual no ayudará en gran medida a sufragar el coste inicial.

Las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar tienen de una parte unas necesidades y de otra unas características específicas. Es necesario tener ambas en cuenta en esta propuesta de mejora y estudiarlas para así optimizar las soluciones que se plantean. Así, se ofrece una solución personalizada y a medida.

En cuanto a las necesidades y posibilidades que se plantean se citan la capacidad actual de combustible, el gasto de combustible por salida o la distribución actual de la plataforma con vista a incluir la tecnología dual fuel.

Las características de las lanchas de instrucción se definen en el punto 3.1.1.2. En él se habla de la planta propulsora y de la distribución de esta en las lanchas. Este punto es importante debido a que es la base donde se realizarán las modificaciones.

Los elementos a incluir, como ya han sido definidos en el apartado 2.7, son los depósitos, las electroválvulas, la boca de carga, las líneas de gas, el reductor y el gasificador, los inyectores, la centralita (ECU) y el conmutador.

Para esto se han estudiado las siguientes propuestas:

1. Conversión de las lanchas de instrucción a dual fuel con GLP.
2. Conversión de las lanchas de instrucción a dual fuel con GNC.

A continuación se comparan, y posteriormente desarrollan, ambas opciones con las variaciones específicas que cada una de ellas supone.

3.2.1 Comparativa de sistemas aplicables.

Con el objetivo de convertir las lanchas de instrucción para que operen además de diésel con gas se incluye el Gas Licuado de Petróleo o el Gas Natural como combustible complementario en ellas. El dual fuel es un sistema que varía en función del gas que se plantea utilizar y como se almacena dicho gas y del sistema de inyección. Por eso se plantean varias opciones de configuración.

Dependiendo del gas que se quiera utilizar tendremos un sistema que se sirva de Gas Licuado de Petróleo o bien de Gas Natural. Ambas opciones son viables y presentan distintas ventajas e inconvenientes como se presenta en la Tabla 3-1.

Gas Licuado Petróleo		Gas Natural	
Ventajas	Inconvenientes	Ventajas	Inconvenientes
Facilidad de almacenamiento	Menor limpieza de combustión	Limpieza de la combustión	Almacenamiento más complicado
Establecimientos que ofrecen	Posible tendencia a desaparecer	Posible tendencia de futuro	Menor número de establecimientos que lo ofrecen
Economía de montaje			Montaje y elementos más caros

Tabla 3-1 Comparativa de ventajas e inconvenientes del GLP y GN

En cuanto al sistema de inyección, debido al coste actual de la tecnología y al nivel de desarrollo de la misma se considera que el sistema óptimo para aplicar en las lanchas de instrucción es el de inyección indirecta de gas.

El método de inyección indirecta de gas combina tecnología y bajo coste. Se puede considerar que realiza una mezcla homogénea de aire y gas. También se puede considerar que realiza una inyección precisa al estar controlado electrónicamente. Además su coste es relativamente bajo.

De otra parte en el mercado existen tres tipos de almacenamiento distintos. Uno para el Gas Licuado de Petróleo y dos para el Gas Natural.

El sistema diseñado para el GLP es relativamente barato y sencillo de instalar. En cuanto al GN ambos sistemas son más caros. El primero, referido al Gas Natural Comprimido, es ligeramente más caro e igualmente sencillo. El segundo, concerniente al Gas Natural Licuado, es más caro que los dos anteriores y más complejo. La ventaja principal del GNL es el aumento de autonomía que supone.

En conclusión, las lanchas requieren de una autonomía limitada en operación habitual y se trata de que el sistema sea lo más sencillo y barato posible. Esto arroja únicamente dos posibilidades, implementar el sistema de GLP o el sistema de GNC. Además, esto supone una ventaja puesto que parte de la instalación es compartida. Es decir, si en un futuro se desea cambiar de combustible no es necesario cambiar la instalación al completo.

3.2.1 Conversión de las lanchas de instrucción a dual fuel con GLP.

En la conversión a dual fuel con Gas Licuado de Petróleo, este combustible seguirá un proceso específico. El transcurso del gas desde que se realiza el repostaje hasta que se realiza la combustión se resume en la Figura 3-9. Todo el proceso se controla por la ECU y monitoriza con diversos sensores.

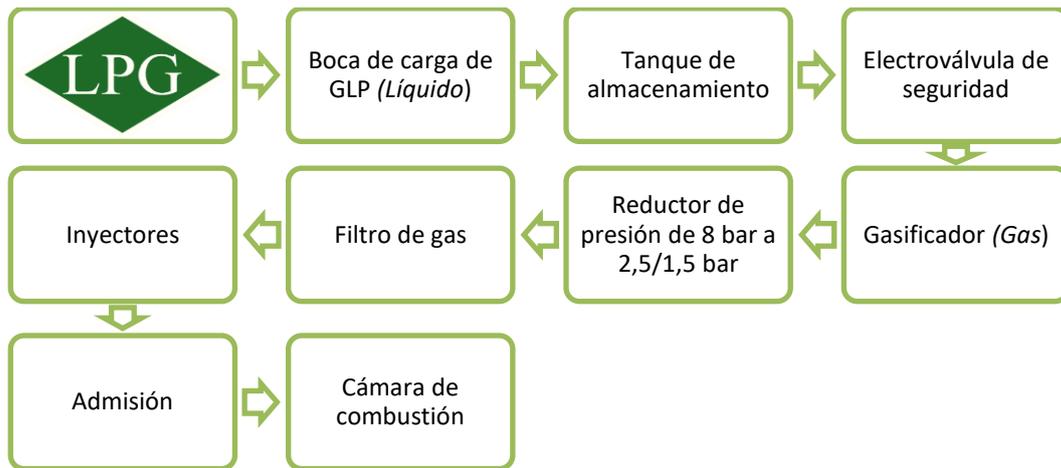


Figura 3-9 Esquema de recorrido del gas para dual fuel GLP

3.2.1.1 Elementos necesarios para conversión a GLP.

La conversión de la planta propulsora a GLP se estudia incluyendo los siguientes elementos:

- Una boca de carga: Esta debe estar fabricada en materiales resistentes a la corrosión como latón o acero. Se instala en un sitio accesible y cercano al lugar de almacenamiento.



Figura 3-10 Boca de carga para gas

- Un conjunto de depósitos: Normalmente se utilizan depósitos de medidas genéricas y se conectan entre ellos. De esta manera se abaratan costes y se pueden conseguir la capacidad necesaria.



Figura 3-11 Tanque de almacenamiento de Gas Licuado de Petróleo

- Unas electroválvulas: Estas se encargan de cerrar el flujo de gas natural hacia la cámara de combustión. Se cerrará cuando no se encuentra el sistema trabajando en modo dual fuel o bien cuando se detecta alguna fuga como medida de seguridad.



Figura 3-12 Electroválvula de seguridad y cierre

- Las líneas de gas: Están fabricados en material plástico para evitar la corrosión con el medio. Además con esto el material otorga una mayor flexibilidad de colocación si existen recodos o lugares de difícil acceso. Están preparadas para transportar fluidos a 30 bar.



Figura 3-13 Línea de gas a alta presión

- Un gasificador: A través de un intercambiador de calor se calienta el fluido hasta 30 °C con lo que el líquido a 8 bar pasa directamente a estado gas. El calor normalmente se obtiene de la refrigeración del motor.



Figura 3-14 Gasificador de GLP

- Un reductor: Reduce la presión de 8 a 2,5/1 bar. La presión final dependerá de la demanda de combustible del motor.



Figura 3-15 Reductor de presión

- Filtro de gas: Asegura que el gas no arrastre impurezas que puedan obstruir el sistema. Se recomienda su cambio cada 1000 h.



Figura 3-16 Filtro de gas

- Los inyectores: Permiten el paso del gas cuando la centralita lo ordena. Se colocan directamente sobre la cámara de admisión. Como se muestra en la



Figura 3-17 Rampa de 4 cilindros de gas

- La centralita (ECU): Controla el proceso así como las variables del proceso. Controla la inyección, la regulación de presión, el corte de gas y el cambio de gasóleo a gas. Además supervisa la temperatura de escape así como las distintas alarmas de fugas.



Figura 3-18 Centralita de control de gas

- Un conmutador: Su función principal es conmutar entre los modos de diésel y dual fuel. Además indica el nivel de gas remanente.



Figura 3-19 Conmutador diésel – dual fuel

3.2.2 Conversión de las lanchas de instrucción a dual fuel con GNC.

En cuanto a la modificación del motor a dual fuel con Gas Natural Comprimido, es necesario resaltar que las principales diferencias son el tipo de gas y cómo se almacena. En este caso el almacenamiento es en estado gas a 200 bar y se utiliza gas natural. De este modo se esquematiza la evolución del gas, sin cambiar de fase (Figura 3-20):

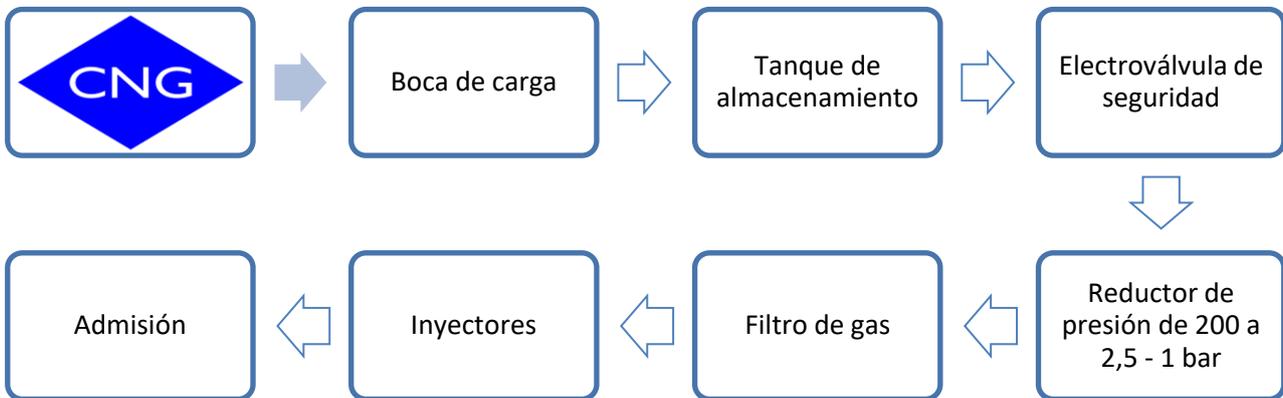


Figura 3-20 Esquema de recorrido del gas para dual fuel GNC

3.2.2.1 Elementos necesarios para conversión a GNC.

Cuando se desea convertir la planta propulsora a Gas Natural Comprimido el sistema comparte elementos con los citados en el punto 453.2.1.1. En concreto comparte los siguientes.

- Una boca de carga (Figura 3-10)
- Líneas de gas de baja presión, se usarán las mismas que para el GLP (Figura 3-13)
- Filtro de gas (Figura 3-16)
- Los inyectores (Figura 3-17)
- La centralita (ECU) (Figura 3-18)
- Un conmutador (Figura 3-19)

Además de ello posee algunos elementos específicos. Sobre todo los que tienen relación con la diferencia de presión entre los dos tipos de almacenamiento.

- Un conjunto de depósitos: Para el gas natural comprimido la presión de tarado de los depósitos será mayor que para GLP. Es por esto que hacen falta tanques específicos.



Figura 3-21 Tanque de almacenamiento de Gas Natural Comprimido [32]

- Unas electroválvulas: Se han de emplear unas electroválvulas especialmente diseñadas para altas presiones. Estas electroválvulas resisten hasta 260 bar. Además están fabricadas en materiales resistentes a la corrosión.



Figura 3-22 Electroválvula de alta presión [53]

- Las líneas de gas de alta presión: Estas líneas están preparadas para la carga de líquido a alta presión. Resisten presiones internas de hasta 250 bar. Se fabrican en acero para hacerlas fáciles de moldear y se recubren de PVC para protegerlas de la corrosión.



Figura 3-23 Líneas de gas fabricadas en acero [53]

- Un reductor: Reduce la presión de 200 bar a 2,5/1 bar. Se realiza la reducción por medio de 2 etapas. La primera de 200 bar a 8 y la segunda de 8 bar a la presión de salida. La presión final dependerá de la demanda de combustible del motor. Este sistema es diseñado específicamente para gas natural comprimido y difiere del anterior.



Figura 3-24 Reductor de presión [53]

3.2.3 Almacenamiento de los gases.

Debido a la diferencia de densidad de los gases, el almacenamiento requerido para sustituir al gasóleo es distinto para ambos. Las salidas en las que más gasóleo se consume sin entrar en puerto son las salidas de las semanas de Instrucción y Adiestramiento. En estas salidas los consumos son de 500 l de gasóleo cada dos días, momento en el que se entra en puerto.

Es necesario calcular para esta autonomía y en esta situación el número de tanques de 250 l para que puedan funcionar el máximo tiempo posible en modo dual fuel.

Combustible	Densidad	Consumo I+A	Consumo en l	Tanques necesarios
Gasóleo	0,84 kg/cm ³	420 kg	500 l	-
Gasóleo en dual fuel	0,84 kg/cm ³	210 kg	250 l	-
Gas Licuado de Petróleo	0,56 kg/cm ³	210 kg	375 l	1,5
Gas Natural Comprimido	0,16 kg/cm ³	210 kg	1312,5 l	5,25

Tabla 3-2 Cálculo de tanques necesarios para garantizar la autonomía mínima

A la luz de los resultados se concluye que debido a la complejidad de transportar 6 tanques de gas de 250 l a la reducida autonomía que este sistema brinda y lo caro que resulta se ha de descartar el sistema de GNC.

Se elige finalmente el sistema de GLP. Puesto que además añadiendo 1 tanque más se puede doblar su autonomía, se propone estudiar el sistema de dual fuel GLP-diésel con 3 tanques de GLP.

Se consigue por ello una autonomía de aproximadamente 32 h de navegación ininterrumpida en modo dual fuel. De esta manera se pueden cubrir dos turnos de semanas de I+A, o incluso, 2 semanas completas de salidas cortas.

3.3 Estudio de viabilidad económica.

Una vez confirmada la viabilidad técnica se estudia la viabilidad económica. Esta sirve para analizar la existencia de beneficio derivado cuando se realiza un proyecto determinado. Si se confirma la obtención de un determinado beneficio, entonces cabrá la posibilidad de continuar el estudio hacia el cálculo del momento de recuperación de la inversión.

Este es un estudio orientativo dado que se basa en hipótesis de futuro que no pueden ser predichas con exactitud. No obstante, se toman valores que tratan de ser lo más ajustados a lo que puede ocurrir.

3.3.1 Balance de la inversión.

Para calcular la rentabilidad se pueden usar diversos factores. En este caso se considera una inversión inicial que se recupera a lo largo del tiempo. Para ello se utiliza un indicador conocido como ROI o RSI (“Return Of Investment” o “Retorno Sobre la Inversión”) a un determinado número de años.

El indicador de Retorno Sobre la Inversión es un porcentaje, utilizado para calcular el rendimiento que una inversión presenta a lo largo del tiempo. Este factor se calcula a un número de años “n”.

$$ROI_n = \frac{\text{Beneficios}_n - \text{Inversión}}{\text{Inversión}} * 100 \quad (1)$$

La inversión se considera una variable fija. Comprende el coste total de realizar la conversión.

$$\text{Inversión} = \text{Coste de realizar la transformación}_{GLP} \quad (2)$$

Los beneficios se calcularán como la diferencia entre el gasto que supondría a la Armada el buque tal y como se encuentra en la actualidad y el coste que supone el uso de la máquina en modo dual fuel.

$$Beneficios = t_{nav} * (Dif_{Diesel-GLP}) \quad (3)$$

siendo

- t_{nav} es el tiempo de navegación en horas
- $Dif_{diésel-GLP}$ es la diferencia de precio entre utilizar el motor en modo diésel o dual fuel por hora

Mientras que los beneficios que reportará el sistema instalado variarán según el precio del gas y del petróleo, el número de horas en funcionamiento del equipo y los mantenimientos a realizar, además del incremento de precios de consumo. Todos ellos se engloban en la Diferencia Diésel-dual fuel.

$$Dif_{Diesel-GLP} = Dif_{PC} - C_{Mant} \quad (4)$$

siendo

- Dif_{PC} es la diferencia de precio de los combustibles por hora navegada
- C_{Mant} es el coste de mantenimiento añadido por incluir el sistema dual fuel por hora navegada

Por lo tanto, la diferencia del gasto del diésel y el dual fuel será la diferencia de precios entre ambos. Es necesario tener en cuenta que la inyección de combustible se realiza al 50 % en masa. Lo cual se ponderada con el porcentaje en masa de los combustibles y su precio.

$$Dif_{PC} = (\beta_D * P_D - (1 - \beta_D) * P_{GLP}) * C_{m_{kg/h D}} \quad (5)$$

siendo

- β_D es la ponderación del gasto másico correspondiente al combustible diésel. En este caso 0,5
- P_D, P_{GLP} son el precio del diésel y el precio del GLP por unidad de masa
- $C_{m_{kg/h D}}$ es el consumo en kg / h de diésel que debería tener la unidad

El coste derivado de los mantenimientos se calcula como proyección en el tiempo. Al objeto de estimar el precio futuro de los mantenimientos se tiene en cuenta el IPC como indicador de la inflación genérico. Así, el coste aumentará con el IPC correspondiente al ejercicio.

$$C_{Mant_n} = C_{Mant_{n-1}} * (1 + IPC) \quad (6)$$

siendo

- C_{Mant_n} es el coste de mantenimiento del año “n”, calculado a partir de la subida de la inflación y el precio del año anterior

3.3.2 Variables económicas tenidas en cuenta.

El estudio económico tiene un tiempo prolongado de aplicación, en este caso se estiman veinte años desde la fecha. Los precios tenidos en cuenta, entonces, variarán a lo largo del tiempo.

Considerando la variable más importante el número de horas navegadas se fija el precio de los carburantes y el aumento de la inflación como previsiones. Se toma el criterio de “*caeteris paribus*”, o “permanecer el resto de variables constantes”, para mostrar los factores que se extraen de una única relación. Esto no significa que no se debe tener en cuenta, sino que en este estudio, por falta de tiempo parece más interesante el estudio de la variabilidad de horas de navegación como punto que más afecta al balance económico.

Se toman como previsiones la variación del precio de los combustibles y también la inflación.

3.3.2.1 Coste de combustible.

Se va a estudiar el precio del combustible para el usuario final en España a fin de aplicar este coste en la viabilidad económica. El coste de los combustibles es variable con el tiempo. En España este coste depende del precio del propio combustible además de los impuestos que se aplican. Así se tienen dos tipos de precios, precios antes de impuestos y precios después de impuestos.

Los precios antes de impuestos son variables y dependen de:

- Coste de extraer el petróleo: Afectado tanto por la oferta y demanda, como por la situación económica y política del lugar geográfico de donde se extrae.
- Coste de refinar el petróleo: Al igual que el coste de extraer el petróleo, es afectado por la oferta y demanda así como por la situación económica y política.
- Coste de logística: Afectado por el coste del transporte (mediante buques u oleoductos).
- Coste de comercialización: Principalmente dependiente del coste de las instalaciones y el personal a su cargo.
- Beneficio industrial: Beneficio que obtiene la empresa de esta transacción.

En el paso siguiente se tiene en cuenta la parte del precio de los hidrocarburos referido a los impuestos. En el caso de los combustibles se cargan dos impuestos:

- Impuesto sobre el Valor Añadido: Como ocurre con cualquier bien o servicio se aplica un 21 % del valor del producto.
- Impuestos especiales sobre hidrocarburos: Dependiendo del tipo de hidrocarburo se imponen cargos distintos. Aquí salen más beneficiados el gas natural y el GLP.

A modo de referencia los cálculos se van a realizar atendiendo a la variación que la EIA (*U.S. Energy Information Administration*) prevé para los carburantes. Cabe destacar el aumento continuo del precio de los carburantes derivados del petróleo, seguido más lentamente por el gas natural. Esta diferencia se prevé más acusada con el tiempo lo que favorece la viabilidad económica de implantación de este sistema [54].

Es necesario tener en cuenta la diferencia de densidades de los combustibles. El cálculo del consumo del combustible se realiza al 50% de diésel-GLP en masa. Por ello, se convierten los precios primero a precio por unidad de masa y posteriormente se obtiene la diferencia. Para referir los cálculos a precio por unidad de volumen, de nuevo, se vuelve a utilizar la densidad de ambos combustibles. Realizados estos cálculos se puede relacionar el consumo previo y el ahorro que de ello derivará.

En la Tabla 3-3 se plantea el precio de los combustibles a lo largo de los próximos 20 años.

Elementos		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Aumento precio GLP	%		1,07%	8,40%	11,15%	13,63%	15,69%	16,90%	17,48%	18,00%	18,36%
Aumento precio diésel	%		1,51%	17,95%	24,60%	26,49%	28,05%	30,03%	31,54%	32,10%	33,78%
Precio estimado GLP	€/l	0,66	0,67	0,72	0,73	0,75	0,76	0,77	0,78	0,78	0,78
Precio estimado diésel	€/l	1,24	1,26	1,46	1,55	1,57	1,59	1,61	1,63	1,64	1,66
Diferencia diésel-GLP	€/l	0,12	0,13	0,21	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28
Elementos		2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Aumento precio GLP	%	19,15%	21,26%	22,11%	23,87%	26,15%	28,18%	29,73%	31,69%	33,75%	34,58%
Aumento precio diésel	%	35,62%	37,74%	39,11%	41,22%	42,20%	43,84%	45,62%	46,60%	47,39%	50,31%
Precio estimado GLP	€/l	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89
Precio estimado diésel	€/l	1,68	1,71	1,72	1,75	1,76	1,78	1,81	1,82	1,83	1,86
Diferencia diésel-GLP	€/l	0,29	0,29	0,30	0,30	0,29	0,29	0,30	0,29	0,28	0,30

Tabla 3-3 Cálculo de la diferencia de coste de los combustibles

3.3.2.2 Inflación.

La inflación se define como el aumento del precio de los productos a lo largo del tiempo. Existen una variedad de indicadores de esta inflación. Dependiendo del índice que se trate se calculará de forma ponderada en relación a su importancia en la sociedad a la que están referidos. Por ejemplo, el Índice de Precios del Consumo, IPC, se basa en un conjunto predeterminado de bienes y servicios genéricos que se consumen por la media de españoles. Por lo general estos bienes están interrelacionados entre sí y son indicadores de la variación en el resto de productos [55, 56].

En el cálculo a largo plazo de costes se estiman los valores que tomarán estos índices. Cuando se trata de suposiciones a corto plazo los organismos encargados de la economía ofrecen cálculos de la inflación entre otras variables. De otro lado, en las previsiones a largo plazo es necesario tomar datos de los estudios al respecto. Se resumen en la siguiente Tabla 3-4:

Organismo	2018	2019	2020	2021-2038
Fondo Monetario Internacional	1,20%	1,40%	1,60%	-
Banco Central Europeo	1,40%	1,50%	1,70%	-
Banco De España	1,50%	1,40%	1,70%	-
PwC Consultora	1,20%	1,40%	1,60%	1,50%

Tabla 3-4 Inflación según distintos organismos y empresas [57, 58, 59, 60]

En el cálculo se toman los valores que ofrece el FMI (para los 3 primeros años) por coincidir con los de una consultora independiente, “Price Waterhouse Coopers”. Para los siguientes se toman los previstos por la empresa PwC [57, 58].

3.3.2.3 Cálculos del balance económico.

Para realizar el balance económico se han tenido en cuenta las siguientes variables:

- Aumento de la inflación (descrito previamente en el presente documento)
- Horas navegadas por las unidades, variando entre tres posibles escenarios:
 - Neutro
 - Optimista
 - Pesimista
- Aumento del precio del combustible (descrito previamente en el presente documento)
- Mantenimientos, destacando:
 - Cambio de filtro de gas cada 1000 h (10 €)
 - Revisión completa del sistema cada 2 años (93,74 €)

Se ha tenido en cuenta el aumento del precio de la inflación sobre las variables de mantenimiento. Puesto que se supone que los combustibles dependen de variables distintas a la inflación española, se fijan los precios según el *U.S. Energy Information Administration* los prevé para los próximos 30 años [54].

Se supone que el personal de la Escuela Naval Militar es capaz de realizar el cambio de filtro de gas, por lo que no se añade costo de horas de trabajo.

El ahorro de combustible es referido a cada unidad y hora de navegación. El precio del cambio de filtros depende de la inflación. El coste de las revisiones depende de las horas de navegación y de la inflación.

En condiciones de caso **neutro**, asumiendo 536 horas de navegación anuales por unidad se plantea el balance como se describe en la Tabla 3-5.

Elementos		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Ahorro combustible	€/ h	1,50	1,57	2,68	3,15	3,12	3,10	3,20	3,31	3,32	3,47
Cambio filtros / 1000 h	€/ h	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
Revisión 2h anual	€/ h	-0,17	-0,18	-0,18	-0,18	-0,19	-0,19	-0,19	-0,19	-0,20	-0,20
Beneficio anual	€		1511,37	1578,76	2767,65	3270,11	3238,21	3210,93	3320,48	3436,96	3449,06
Balance económico	€	-15176,65	-13665,28	-12086,52	-9318,87	-6048,76	-2810,55	400,38	3720,86	7157,82	10606,88

Elementos		2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Ahorro combustible	€/ h	3,60	3,63	3,70	3,77	3,66	3,65	3,70	3,62	3,51	
Cambio filtros / 1000 h	€/ h	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
Revisión 2h anual	€/ h	-0,20	-0,21	-0,21	-0,21	-0,22	-0,22	-0,22	-0,23	-0,23	-0,23
Beneficio anual GLP	€	3607,59	3742,70	3776,90	3849,26	3917,21	3799,41	3784,15	3834,22	3749,07	3629,97
Balance económico	€	14214,47	17957,17	21734,07	25583,32	29500,53	33299,94	37084,08	40918,30	44667,37	48297,34

Tabla 3-5 Cálculo del balance económico para el caso neutro

Para el cálculo del escenario **pesimista**, planteando 315 horas de navegación anuales se realiza la Tabla 3-6.

Elementos		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Ahorro combustible	€/ h	1,50	1,57	2,68	3,15	3,12	3,10	3,20	3,31	3,32	3,47
Cambio filtros / 1000 h	€/ h	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
Revisión 2h anual	€/ h	-0,30	-0,30	-0,31	-0,31	-0,32	-0,32	-0,33	-0,33	-0,33	-0,34
Beneficio anual	€		849,10	888,15	1586,21	1880,82	1861,46	1844,80	1908,55	1976,36	1982,82
Balance económico	€	-15176,65	-14327,55	-13439,40	-11853,18	-9972,37	-8110,91	-6266,11	-4357,56	-2381,20	-398,38

Elementos		2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Ahorro combustible	€/ h	3,60	3,63	3,70	3,77	3,66	3,65	3,70	3,62	3,51	
Cambio filtros / 1000 h	€/ h	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
Revisión 2h anual	€/ h	-0,35	-0,35	-0,36	-0,36	-0,37	-0,37	-0,38	-0,38	-0,39	-0,39
Beneficio anual	€	2075,32	2154,05	2173,47	2215,30	2254,53	2184,59	2174,89	2203,58	2152,80	2082,05
Balance económico	€	1676,94	3830,99	6004,46	8219,76	10474,29	12658,87	14833,77	17037,35	19190,15	21272,20

Tabla 3-6 Cálculo del balance económico para el caso pesimista

En la Tabla 3-7 se realiza el cálculo económico para el caso **optimista**, teniendo en cuenta 656 horas de navegación anuales.

Elementos		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Ahorro combustible	€/ h	1,50	1,57	2,68	3,15	3,12	3,10	3,20	3,31	3,32	3,47
Cambio filtros / 1000 h	€/ h	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
Revisión 2h anual	€/ h	-0,14	-0,14	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,16	-0,16	-0,16	-0,16
Beneficio anual	€		1870,98	1953,75	3409,15	4024,47	3985,77	3952,72	4087,14	4230,04	4245,21
Balance económico	€	-15176,65	-13305,67	-11351,92	-7942,77	-3918,30	67,48	4020,19	8107,33	12337,38	16582,59

Elementos		2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037
Ahorro combustible	€/ h	3,60	3,63	3,70	3,77	3,66	3,65	3,70	3,62	3,51	
Cambio filtros / 1000 h	€/ h	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
Revisión 2h anual	€/ h	-0,17	-0,17	-0,17	-0,17	-0,18	-0,18	-0,18	-0,18	-0,19	-0,19
Beneficio anual	€	4439,59	4605,32	4647,54	4736,47	4820,02	4676,23	4657,95	4719,63	4615,82	4470,47
Balance económico	€	21022,18	25627,50	30275,03	35011,50	39831,52	44507,76	49165,71	53885,33	58501,16	62971,63

Tabla 3-7 Cálculo del balance económico para el caso optimista

3.3.2.4 Resultados del balance económico.

En cualquiera de los casos la inversión se recupera en menos de 10 años. Debido a que se estima una vida útil de las unidades modificadas de, en el peor de los casos, 30 años, se afirma que la conversión es rentable. Además con el añadido de que se obtiene un Retorno Sobre la Inversión a 20 años de entre un 240% y un 515%. El promedio de ahorro por hora navegada se encuentra en 6,23 € por unidad para el caso neutro. Esto si lo comparamos con el coste actual supone un ahorro de un 20%. A continuación se resumen los datos más importantes, que provienen de los cálculos previos a este documento, en la Tabla 3-8 y la Figura 3-25.

Elemento	Neutro	Optimista	Pesimista
ROI/ RSI	413,26%	514,92%	240,16%
Tiempo de retorno de inversión	5 años y 6 meses	4 años y 8 meses	8 años y 10 meses
Promedio de ahorro por hora navegada	6,23 €	6,27 €	6,09 €

Tabla 3-8 Balance económico de la inversión

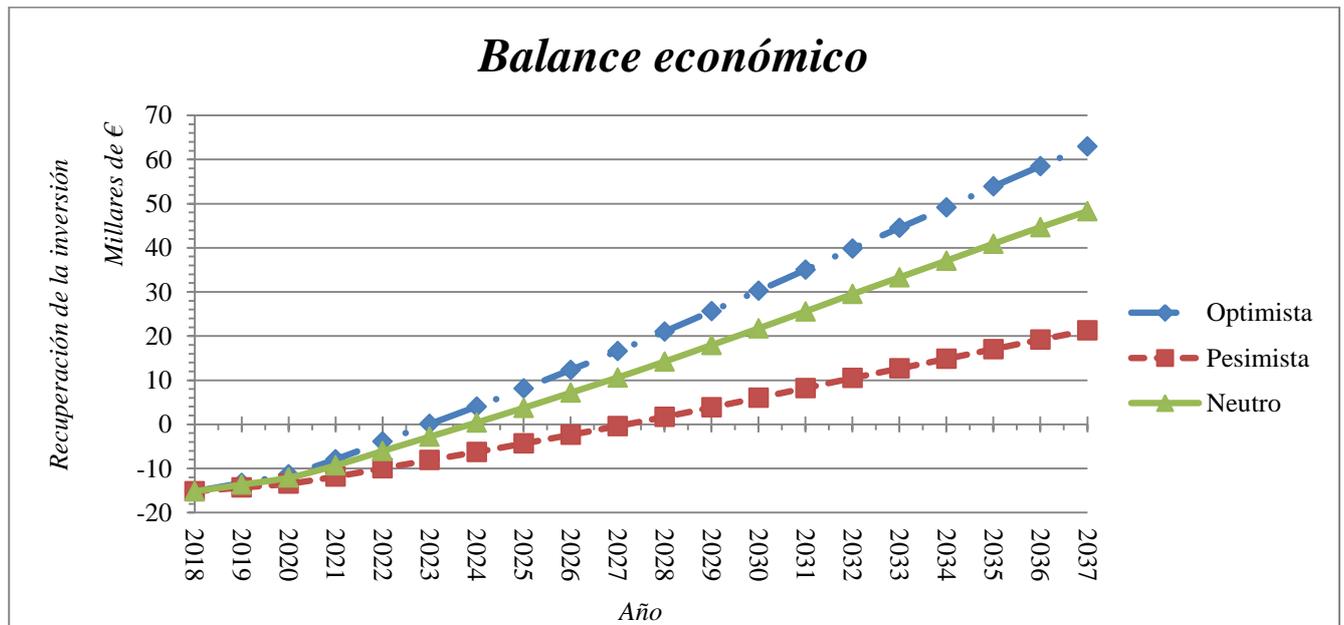


Figura 3-25 Recuperación de la inversión en millares de euros y años

Debido a que se obtiene un beneficio de la inversión realizada, se puede afirmar que el proyecto es viable técnicamente así como económicamente. Quedan así, las viabilidades financiera y comercial por evaluar.

Se ha de tener en cuenta que en el cálculo no se puede tener en cuenta que el factor de mantenimiento se ve mejorado por la limpieza de combustión. Esto es debido a que no se poseen datos fiables ni cuantificables de esta mejoría.

3.4 Estudio de viabilidad financiera.

La posibilidad de disponer de fondos para poder costear el proyecto se evalúa en este apartado. Para ello se tiene en cuenta el coste de la inversión necesaria para poner en marcha el proyecto, además del presupuesto del que se dispone.

La inversión necesaria atiende al siguiente presupuesto (Tabla 3-9), calculado para realizar la conversión de una unidad a dual fuel. Este presupuesto es por cada unidad.

Elementos	Coste por unidad GLP en €	Coste por unidad GNC en €	Número de unidades	Total unidad GLP en €	Total unidad GNC en €
Mano de obra	46,87	46,87	60	2812,20	2812,20
Tanques de gas	2348,55	4890,56	3 - 11	7045,65	53796,16
Inyectores	125,36	125,36	12	1504,32	1504,32
Líneas de gas GNC	-	15,6	15	0,00	234,00
Líneas de gas GLP	5,81	-	15	87,15	0,00
Gasificador	84,19	-	2	168,38	0,00
Reductor de presión	237,36	631,58	1	237,36	631,58
Filtro de gas	20,38	20,38	1	20,38	20,38
Conmutador dual fuel	14,56	14,56	1	14,56	14,56
Alarmas	11,53	11,53	2	23,06	23,06
Boca de Carga	8,07	8,07	1	8,07	8,07
ECU	295,85	295,85	2	591,70	591,70
Electroválvula de corte	29,86	62,16	1	29,86	62,16
Subtotal				12.542,69 €	59.698,19 €
Impuesto sobre el Valor Añadido	21%			2.633,96 €	12.536,62 €
Total				15.176,65 €	72.234,81 €

Tabla 3-9 Presupuesto de modificación de las lanchas de instrucción para GLP y GNC [25]

En este caso no se disponen de datos específicos acerca de la cantidad económica que puede ser otorgada a la modificación de estas unidades, de forma que se referencia a los presupuestos generales de los ejércitos.

En los años 2016 y 2017 se presupuestaron 5.788 y 7.639 millones de euros respectivamente. De ellos, en 2016 se destinaron 151 millones de euros mientras que en 2017 fueron 143 millones de euros.

Teniendo en cuenta que Si se realiza la comparativa en porcentaje con respecto a la inversión propuesta se trata de un 0,0423 % del presupuesto de la Armada para el año 2017, o un 0,00079% del presupuesto general para las Fuerzas Armadas en el mismo año. Esta comparativa se realiza teniendo en cuenta que se realice la modificación sobre las cuatro unidades [61].

Así se confirma que esta inversión no representa un porcentaje superior al 0,05 % del presupuesto para la Armada, siendo menor este porcentaje en comparación al presupuesto de las Fuerzas Armadas. Por ello suponemos que existe viabilidad financiera para apoyar este proyecto, dado que no se dispone de datos que afirmen lo contrario.

3.5 Estudio de viabilidad comercial.

La viabilidad comercial en el caso de este proyecto, en el que se toma el beneficio como ahorro previsto en combustibles, se justifica como la cantidad de horas que navegan las unidades. Se emplea un análisis de sensibilidad en el que influirá el estado de la economía. Para determinar el número de horas que se prevén en cuanto a funcionamiento se ha de estudiar la vida útil remanente de las unidades así como las horas que navegarán.

Se estima un ciclo de vida útil de al menos 30 años, dado que realizados los mantenimientos pertinentes este ciclo de vida es el esperado de cualquier barco. Este caso se puede incluso alargar si tenemos en cuenta que las lanchas de instrucción están fabricadas en fibra, aunque para más seguridad en la inversión se obvia ese margen por ser positivo. Teniendo en cuenta que las lanchas de instrucción fueron construidas entre el 2007 y 2008 podemos afirmar que contamos con 19 años de amortización para el peor de los casos.

Las lanchas de instrucción actualmente realizan un número de salidas semanalmente, además de distintos períodos en los que se realizan salidas de pernoctas. Anualmente, en dos ocasiones se realizan las salidas conocidas como “Instrucción y Adiestramiento” (I+A). Excepcionalmente se realizan salidas más largas, en que se visitan puertos más lejanos.

La Tabla 3-10 resume el número de salidas y horas navegadas. Entre paréntesis se presenta el caso excepcional de los alumnos Con Titulación, dado que siguen un plan de instrucción específico.

Salidas	Horas por salida	Turnos y días	Salidas al año	Total en horas por unidad
Semanales	4	3 * 1+(1 * 1)	21+ (15)	252 + 60
Pernocta / Nocturna	8	3 * 2+(1 * 2)	2+ (1)	96 + 16
I+A	8	3 * 2	2	96
Extraordinarias	8	1 * 2	1	16

Tabla 3-10 Horas navegadas por las lanchas de instrucción

- En las salidas semanales los equipos de propulsión permanecen arrancados una media de cuatro horas cada salida y se realizan tres salidas martes, miércoles y jueves, además de una específica para alumnos “Con Titulación” (entre paréntesis). Se regresa al puerto base (Marín) al finalizar cada salida.
- En las salidas de pernocta los equipos trabajan durante aproximadamente ocho horas cada día, alargándose la salida dos días por norma general (viernes y sábado). En este período, las lanchas normalmente navegan a otro puerto o pasan la noche fondeadas hasta regresar al día siguiente a Marín. Los alumnos “Con Titulación” también realizan una de estas salidas cada año.
- Las semanas de instrucción exigen que los equipos permanezcan arrancados una media de ocho horas cada día con una duración de seis días (de lunes a sábado a.i.). Generalmente por cada turno se navega hacia un puerto en otra ría el primer día del turno, donde se pasa la noche atracados, y el segundo se regresa a la Escuela Naval Militar.
- Para las salidas a puertos más lejanos, las lanchas de instrucción varían tanto en los días que permanecen navegando como en las horas que están sus equipos arrancados. Por norma general las salidas de estas duran tres días y permanecen arrancados ocho horas. Se atraca dos días en un puerto distinto al puerto base, para regresar al tercer día.

El proveedor de la planta propulsora (Caterpillar) declara el consumo de la máquina según se indica en la Tabla 3-11. De otro lado según la experiencia obtenida en las distintas salidas y con los consumos de combustible registrados se obtienen conclusiones ligeramente distintas. Los resultados experimentales se registran también en la Tabla 3-11.

RPM	Cons. real en l / h*motor	Cons. homologado en l / h*motor	Vel. kts*2 motores
600	12	N/D	6
800	15	9,4	8
1000	30	21,5	9
1200	40	28,5	10
1500	80	52,7	13
1800	115	91,7	17
2000	145	135,4	21

Tabla 3-11 Consumo motor Caterpillar C18 [51]

En las lanchas de instrucción las velocidades rondan entre los seis y ocho nudos siendo en momentos puntuales de diez nudos. Es por ello que los consumos son generalmente entre 12 y 15 l/h. Es necesario tener en cuenta que los consumos son referidos a un solo motor y las lanchas de instrucción poseen dos. Por ello el consumo final será entre 24 y 30 l/h.

Se toma como referencia el informe de consumos de gasóleo del pasado mes de Noviembre puesto que se llevaron a cabo tres de las distintas actividades (Adjunto como Tabla 3-12). Se realizaron salidas semanales, la semana de “Instrucción y Adiestramiento” y una salida nocturna.

Día	Actividad	Tiempo de funcionamiento en h	Consumo en l	Promedio l/h
28	Salida semanal	4	100	12,5
29	Salida semanal	4	100	12,5
13	Salida I+A	8	250	15,6
14	Salida I+A	8	250	15,6
24	Salida pernocta	8	250	15,6
25	Salida pernocta	8	250	15,6

Tabla 3-12 Consumos A-121 “G.M. Barrutia” en noviembre de 2017

Es necesario tener en cuenta que los equipos de medida poseen un error en la medida del combustible en el depósito de +/- 10 l. En la tabla se aprecia que generalmente en las salidas semanales el gasto de combustible por hora es algo menor que en las salidas más largas debido a que se realizan ejercicios que no demandan velocidades altas.

Además con los datos obtenidos se calcula el gasto semanal de combustible según las actividades que se realizan. Queda representado en la Tabla 3-13.

Semana	Actividad	Consumo total l	Días navegados
13 al 19	I+A	1500	6
19 al 26	Salidas semanales y pernocta	700	4
26 al 4	Salidas semanales	300	3

Tabla 3-13 Consumos semanales A-121 “G.M. Barrutia” en noviembre de 2017

3.5.1.1 Variabilidad de los factores.

El número de salidas que se realizan dependen del número de alumnos. Siendo estas salidas a la mar más frecuentes y utilizando más unidades cuanto mayor es el número de alumnos.

Atendiendo a casos históricos, en los años académicos 2013-2014 y 2014-2015 únicamente salían a la mar 3 unidades en 3 turnos a la semana, para realizar 19 salidas semanales, 2 nocturnas y 2 semanas I+A . En los periodos 2015-2016 y 2016-2017 debido a un aumento considerable en los alumnos en los primeros cursos salen a navegar 4 unidades en 3 turnos distintos, añadiendo 2 salidas semanales. En el periodo actual, de 2017-2018, como resultado de la incorporación de los alumnos de cuerpo general con titulación se establece además un turno específico para su adiestramiento que comprende 15 salidas “semanales” y 2 nocturnas y pernoctas.

- Se establece el escenario registrado en 2013-2014 como posibilidad pesimista. El periodo 2011 a 2013, coincidiendo con la segunda recesión española, es el punto de crecimiento más negativo en la recientemente bautizada “Gran Recesión”. Es por tanto el final de este periodo, posiblemente, el más pesimista, económicamente hablando, de los últimos años [62].
- El momento actual se mantiene como previsión neutra, puesto que parece que es el objetivo de futuro, al menos a corto plazo, que se persigue en la Escuela Naval Militar. El crecimiento es ligeramente positivo con tendencia a mantenerse [57, 58].
- Para el caso optimista se supone que debido al ahorro que conlleva esta mejora se aumente el número de salidas semanales a 23, el número de salidas extraordinarias a 2 y que se establezca el grupo de los alumnos con titulación, quedando así 4 turnos semanales.

Se resume este apartado en la siguiente Tabla 3-14:

Posibil.	Uds.	Salidas			Inst. y Adto.	Extraord.	Horas por turno	Turnos especiales	Turnos semanales	Horas totales
		sem.	Noct./Pern							
Optimista	4/4	23	2	2	2	156	0	4	656	
Pesimista	3/4	19	2	2	0	105	0	3	315	
Neutro	4/4	21	2	2	1	148	1	3	536	

Tabla 3-14 Horas de navegación de las lanchas de instrucción para cada escenario

De este apartado parece lógico razonar que:

- El número de horas que realizan las lanchas de instrucción a lo largo de cada año académico se acota en tres escenarios, para los cuales, la hipótesis de viabilidad comercial sería cierta.

4 CONCLUSIONES.

Haciendo una revisión del estado del arte de la tecnología expuesta y experimentada en motores con diversas aplicaciones, se concluye:

En la mayoría de los casos, las conversiones a dual fuel poseen destacables ventajas sobre los motores diésel tradicionales: el ahorro económico en combustible, una combustión más limpia (implicando a su vez, un aminoramiento en costes de mantenimiento) y la reducción de las emisiones contaminantes a la atmósfera.

Dicha transformación de diésel a dual fuel es factible en motores modernos y los costes de transformación son sensiblemente menores (gracias al mejor control de la electrónica). El sistema permite sustituir el consumo de diésel hasta un 95%, aunque el rendimiento y durabilidad óptimos se consiguen con un 50% de sustitución en masa del gasóleo por gas. Para realizar la modificación es necesario incorporar un sistema de alimentación de gas con su correspondiente depósito, al motor diésel.

En el estudio referente a patrullero Tabarca, el análisis del sistema de propulsión refleja que la transformación del motor es de gran complejidad y alto coste, lo cual lo hace inviable económicamente.

En las lanchas de instrucción, es viable técnicamente instalar este sistema tanto para GNC como para GLP. Sin embargo, el uso de GNC presenta una serie de desventajas frente al GLP: elevado coste del sistema y necesidad de mayor espacio para almacenamiento. El GLP requiere de un sistema de almacenamiento más reducido, sencillo y económico que el GNC, resultando ideal para ser transportado en casi cualquier plataforma.

El periodo de amortización de la inversión se establece en una horquilla que comprende desde los cuatro años y ocho meses hasta los ocho años y diez meses, en el peor de los casos, supuestos en función del número de horas navegadas por las unidades. El ROI obtenido a 20 años (vida útil restante de las embarcaciones) varía desde el 515% hasta el 240%. Por cada hora de navegación se estima un ahorro medio de entre 6,09 € y 6,27 €.

5 LÍNEAS FUTURAS.

La tecnología dual fuel es un conjunto de técnicas todavía en desarrollo. Es por ello que aún existen muchos campos de investigación a tener en cuenta.

En este documento se han citado datos concernientes a emisiones de gases contaminantes que han sido facilitados por los fabricantes. Es por ello que es necesario contrastar dichos datos en la práctica y probar su veracidad.

Relacionado con la reducción del ensuciamiento del motor y de las emisiones, se cita el menor mantenimiento que implica esta tecnología, debido a la reducción de partículas principalmente. Parece lógico continuar la línea de investigación, de cara a seguir aminorando el ensuciamiento de las emisiones de partículas y cuantificar los ahorros obtenidos.

Además se propone testar el sistema previamente sobre un banco de pruebas, y con ello, analizar los mantenimientos necesarios, así como las características del sistema en la práctica.

Como queda patente en el documento, el gas natural, aunque es más limpio es difícil de almacenar. Es por esto, que se propone continuar el estudio en el ámbito relativo a la reducción de costes de almacenamiento, o bien, estudiar la instalación del sistema en buques de nueva creación.

Teniendo en cuenta el auge de esta tecnología, y la tendencia prevista de ser implantada a bordo de gran cantidad de buques mercantes, cabría la posibilidad de estudiar la extensión de este trabajo a otras plataformas navales de la Armada Española.

6 BIBLIOGRAFÍA.

- [1] C. Abagnale, C. Camaretti, L. De Simio, M. Gambino, S. Iannaccone y R. Tuccillo, «Combined numerical-experimental study of dual fuel diesel engine,» *Energy procedia*, n° 45, pp. 721-730, 2014.
- [2] R. Papagiannakis, C. Rakopoulos, D. Hountalas y D. Rakopoulos, «Emission characteristics of high speed, dual fuel, compression ignition engine operating in a wide range of natural gas/diesel fuel proportions,» *Fuel*, 2009.
- [3] L. Jie, Y. Fuyuan, W. Hewu, O. Minggao y H. Shougang, «Effects of pilot fuel quantity on the emissions characteristics of a GNC/diesel dual fuel engine with optimized pilot injection timing,» *Applied energy*, pp. 201-206, 2013.
- [4] Naciones Unidas, «Noticias: Un 80% del comercio mundial depende del transporte marítimo.,» Organización Marítima Internacional, [En línea]. Available: <http://www.un.org/spanish/News/story.asp?NewsID=35947#.Wnrq3aigKyI>. [Último acceso: 7 2 2018].
- [5] International Maritime Organisation, «Air pollution and GHG emmissions,» International Maritime Organisation, [En línea]. Available: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Default.aspx>. [Último acceso: 6 2 2018].
- [6] M. MAN, «Motor Dual fuel - Desarrollado en la manera correcta,» Copenhagen, 2014.
- [7] Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, «El Gas Natural - Energía - M° de Energía, Turismo y Agenda Digital,» Gobierno de España, [En línea]. Available: <http://www.minetad.gob.es/energia/Gas/Paginas/Index.aspx>. [Último acceso: 19 1 2018].
- [8] Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital, «Gases Licuados del Petróleo (GLP) - Energía - M° de Energía, Turismo y Agenda Digital,» Gobierno de España, [En línea]. Available: <http://www.minetad.gob.es/energia/glp/Paginas/Index.aspx>. [Último acceso: 19 1 2018].
- [9] M. Muñoz Domínguez y A. J. Rovira de Antonio, Máquinas térmicas, UNED, 2014.
- [10] F. Payri González y J. Desantes Fernández, Motores de Combustión Interna Alternativos, Valencia: Universitat Politècnica de València, 2011.

- [11] J. B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill, 1988.
- [12] Editors of *Encyclopædia Britannica*, «Injector,» *Encyclopædia Britannica*, [En línea]. Available: <https://www.britannica.com/technology/injector>. [Último acceso: 1 2 2018].
- [13] J. Perales Garat, *Motores*. Publicación 2601., Escuela Naval Militar, 2001.
- [14] D. Agudo, «Revista Motor,» [En línea]. Available: <https://revistamotor.eu/index.php/de-calle/mecanica/357-funcionamiento-del-sistema-common-rail>. [Último acceso: 6 2 2018].
- [15] I. Fernández Diego, S. Pérez Remesal y C. Renedo Estébanez, «Termodinámica y Máquinas térmicas. Universidad de Cantabria,» [En línea]. Available: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1447/course/section/1880/T%2005%20OCW.pdf>. [Último acceso: 12 2 2018].
- [16] De Motor, «Diferencias entre el ciclo real y teórico,» [En línea]. Available: <https://demotor.net/motores-termicos/motor-diesel/diferencia-ciclo-diesel-real-y-teorico>. [Último acceso: 2 2 2018].
- [17] International Maritime Organisation, *MARPOL 73/78*, 1978.
- [18] M. A. MacKinnon, J. Brouwer y S. Samuelsen, «The role of natural gas and its infrastructure in mitigating greenhouse emissions,» *Progress in Energy and Combustion science*, nº 64, pp. 62-92, 2018.
- [19] Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente, «Base de datos pública de indicadores medioambientales,» Gobierno de España, [En línea]. Available: http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/informacion-ambiental-indicadores-ambientales/bpia_2013_ficha_web_transporte-emisiones_contaminantes_rev_tcm7-341564.pdf. [Último acceso: 31 1 2018].
- [20] European Commission, «Climate strategies & targets,» European Commission, [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_en. [Último acceso: 24 2 2018].
- [21] Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, «Objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero,» Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, [En línea]. Available: <http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/objetivos.aspx>. [Último acceso: 12 2 2018].
- [22] United Nations Climate Change, «Status of the Doha Amendment,» United Nations Climate Change, [En línea]. Available: http://unfccc.int/kyoto_protocol/doha_amendment/items/7362.php. [Último acceso: 2 2 2018].
- [23] Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, «El comercio de derechos de emisión en la Unión Europea,» [En línea]. Available: <http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/comercio-de-derechos-de-emision/el-comercio-de-derechos-de-emision-en-la-union-europea/default.aspx>. [Último acceso: 3 2 2018].
- [24] European Energy Exchange, «Emission Spot Primary Market Auction Report,» European Energy Exchange, 2015-2017. [En línea]. Available: <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/auction-market/european-emission-allowances-auction/european-emission-allowances-auction-download>. [Último acceso: 20 2 2018].

- [25] Power Sea Saver, «Autogas GLP-GNC,» PSS, [En línea]. Available: <https://www.autogasglp.info/>. [Último acceso: 16 2 2018].
- [26] A. P. Carlucci, A. de Risi, D. Laforgia y F. Naccarato, «Experimental investigation and combustion analysis of a direct injection dual fuel Diesel-Natural gas engine,» *Energy*, n° 33, pp. 256-263, 2008.
- [27] A. Ulugbek, T. Eiji y K. Nobuyuki, «Combustion and exhaust emission characteristics of Diesel micro pilot ignited Dual- Fuel engine,» de *Diesel Engine - Combustion, Emissions and Condition Monitoring*, InTech, 2013, pp. 33-62.
- [28] Ministerio de Defensa, «Responsabilidad Social Corporativa de las Fuerzas Armadas,» 2010.
- [29] B. Ashok, S. Denis Ashok y C. Ramesh Kumar, «GLP diesel dual fuel engine – A critical review,» *Alexandria Engineering Journal*, n° 54, pp. 105-126, 2015.
- [30] DimSport, «El sistema dual fuel,» DimSport TM., [En línea]. Available: <http://www.dimsport.es/es/sistema-dual-fuel-con-la-plataforma-d-gid>. [Último acceso: 10 2 2018].
- [31] Wärtsila, «dual fuel engines in generating sets,» Wärtsila, [En línea]. Available: <https://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/engines-generating-sets/dual-fuel-engines/wartsila-50df>. [Último acceso: 29 1 2018].
- [32] J. C. Arbex Sánchez, «Conversión del Buque "Texelstroom" construido por LaNaval,» *Marina Civil*, n° 118, pp. 49-70, 2017.
- [33] MetroGas, «Asistencia Técnica,» MetroGas, [En línea]. Available: http://www.metrogas.cl/industria/asesoria_tecnica_1. [Último acceso: 24 1 2018].
- [34] LGC components, «LCG Conversion Kits - Air Fuel Mixer,» LGC, [En línea]. Available: <http://www.lgc.hk/Products1025.htm>. [Último acceso: 29 1 2018].
- [35] Yanmar, «Yanmar technical review,» Yanmar, [En línea]. Available: https://www.yanmar.com/global/technology/technical_review/2015/0727_2.html. [Último acceso: 30 1 2018].
- [36] Westport, «Leading technologies, HPDI,» Westport, [En línea]. Available: <http://www.westport.com/is/core-technologies/hpdi-2>. [Último acceso: 30 1 2018].
- [37] E. Mattarella, C. A. Rinaldina y V. I. Golovitchevb, «CFD-3D analysis of a light duty dual fuel (Diesel/Natural Gas) combustion engine,» *Energy procedia*, n° 45, p. 929 – 937, 2017.
- [38] S. M. E. Ten Broeke y J. Visscher, «Method of switching from a liquefied gas fuel to a liquid fuel being provided to a direct injection combustion engine, and direct injection bi-fuel system for such an engine.». Europa, USA, Patente a nivel mundial. Patente WO2012177128 A1, EP2724007B1, US20140311445, 20 06 2012.
- [39] Dirección General de Política Energética y minas, «Normas de gestión técnica del sistema gasista,» Madrid, 2011.
- [40] Gas Natural Fenosa, «El Gas Natural,» Gas Natural Fenosa, [En línea]. Available: <http://www.gasnaturalfenosa.com.co/co/hogar/el+gas+natural/1297102453941/que+es.html>. [Último acceso: 29 01 2018].

- [41] Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos, «Informe estadístico anual 2016,» 2017.
- [42] Enagas, «Mapa de infraestructuras de Enagás en España,» Enagas, [En línea]. Available: http://www.enagas.es/enagas/es/Transporte_de_gas/TransporteYOperacion/MapaInfraestructuras. [Último acceso: 25 1 2018].
- [43] Enagas, «Proyectos y nuevas infraestructuras,» Enagas, [En línea]. Available: http://www.enagas.es/enagas/es/Transporte_de_gas/ProyectosYUltimasInfraestructuras. [Último acceso: 25 1 2018].
- [44] Indox, «Indox productos,» [En línea]. Available: <http://www.indox.com/productos/>. [Último acceso: 31 1 2018].
- [45] Demaco, «Demaco, It's all about cyogenius,» [En línea]. Available: <https://www.demaco.nl/en/products/vacuum-insulated-transfer-lines-vip/>. [Último acceso: 31 1 2018].
- [46] R. Mangas Calvo, «Gestión del boil off gas en la planta de regasificación,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2013.
- [47] E.N. Bazán-MTU, Características motor Bazán MTU 16V 956 TB91, 1980.
- [48] Armada Española - Esengra, Esengra: Motor Bazán MTU 16V 956 TB91.
- [49] Aficionados a la Mecanica, «Bombas de inyección en linea,» [En línea]. Available: <http://www.aficionadosalamecanica.net/curso-bomba-linea.htm>. [Último acceso: 28 2 2018].
- [50] Rodman Polyships, «Rodman 66,» Rodman Polyships, [En línea]. Available: <https://rodman.es/es/patrulleras/26-patrullera-rodman-66.html>. [Último acceso: 8 2 2018].
- [51] Caterpillar, «Caterpillar C18 Recreativo,» Caterpillar, [En línea]. Available: https://www.cat.com/es_MX/products/new/power-systems/marine-power-systems/high-performance-propulsion-and-maneuvering-solutions/18494382.html. [Último acceso: 7 2 2018].
- [52] Caterpillar, Parts Manual C18 Marine engine, 2004.
- [53] Tomasseto Achile, «GNC Reducers Model AT12,» Tomasseto Achile, [En línea]. Available: <https://www.tomasseto.com/en/products/cng-reducers/model-at12>. [Último acceso: 10 2 2018].
- [54] U.S. Energy Information Administration, «U.S. Energy Information Administration International Energy Outlook 2017,» 2017.
- [55] F. Alonso Sánchez, J. Ayuso Huertas y J. Martínez Pagés, «El contenido informativo de los tipos de interés sobre la tasa de inflación española,» SEPI, Madrid, 2005.
- [56] C. González Correa, S. Rodríguez Feijoo y A. Rodríguez Caro, «Análisis de la convergencia de los precios a través de la información que aportan los índices de precios de consumo.,» *Revista Asturiana de Economía*, nº 23, pp. 55-68, 2002.
- [57] Fondo Monetario Internacional, «Datos económicos y financieros,» Fondo Monetario Internacional, [En línea]. Available: <http://www.ine.es/fmi/nsdp.htm>. [Último acceso: 2 2 2018].
- [58] PwC, «The world in 2050,» 2017.

- [59] Banco Central Europeo, «Proyecciones macroeconómicas elaboradas por los expertos del Eurosistema,» Banco Central Europeo, [En línea]. Available: http://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/other/ecb.projections201712_eurosystemstaff.es.pdf. [Último acceso: 15 2 2018].
- [60] Banco de España, «Proyecciones macroeconómicas,» Banco de España, [En línea]. Available: https://www.bde.es/bde/es/secciones/informes/Publicaciones_de/Proyecciones_mac/. [Último acceso: 25 2 2018].
- [61] Ministerio de Defensa, «Presupuesto de defensa 2017,» Septiembre 2017. [En línea]. Available: <http://www.defensa.gob.es/Galerias/presupuestos/presupuesto-defensa-2017.pdf>.
- [62] Banco Bilbao Vizcaya Argentaria, «¿Cuántas recesiones ha tenido la crisis en España?,» Banco Bilbao Vizcaya Argentaria, [En línea]. Available: <https://www.bbva.com/es/cuantas-recesiones-ha-tenido-la-tesis-en-espana/>. [Último acceso: 2 2 2018].