



Aplicaciones de la inyección de agua en motores marinos

Trabajo Fin de Grado
Grado en Tecnologías Marinas
Septiembre de 2021

Autor:
Rubén Darío León Pérez
42.223.367J

Tutora:
Prof. Dr. Dña. Amanda Peña Navarro

Escuela Politécnica Superior de Ingeniería
Sección Náutica, Máquinas y Radioelectrónica Naval
Universidad de La Laguna

D/D^a. Dra Amanda Peña Navarro, Profesora de la UD de Ingeniería Marítima, perteneciente al Departamento de Ingeniería Agraria, Náutica, Civil y Marítima de la Universidad de La Laguna:

Expone que:

D. **Rubén Darío León Pérez** con **DNI 42223367-J**, ha realizado bajo mi dirección el trabajo fin de grado titulado: **Aplicaciones de la inyección de agua en motores marinos**.

Revisado dicho trabajo, estimo reúne los requisitos para ser juzgado por el tribunal que sea designado para su lectura.

Para que conste y surta los efectos oportunos, expido y firmo el presente documento.

En Santa Cruz de Tenerife a 13 de Septiembre de 2021.

Fdo.: Amanda Peña Navarro.

Director del trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, en primer lugar, a mi familia, por todo el apoyo que me han brindado durante tantos años de carrera, siempre estuvieron ahí en los buenos momentos, pero, sobre todo, en los malos momentos, donde quería abandonar, donde me sentía frustrado, en esos momentos donde supieron guiarme cuando estaba perdido, tendiéndome la mano para seguir adelante, manteniendo mi ilusión alta en todo momento. Al fin se termina una etapa importante de mi vida y espero seguir compartiendo con ustedes las nuevas etapas que estén por venir. ¡Os quiero mucho familia!

A Elvira, mi mayor confidente, no estuviste en todo el trayecto, pero desde que te subiste al barco, me diste una motivación adicional para llegar a ser un oficial de máquinas del que te sintieras orgullosa. Has hecho un esfuerzo enorme para comprender este sector y entender porqué tanto me gusta y tú, mejor que nadie, sabes lo que este avance significa para mí, para nosotros.

No tengo palabras para agradecerte toda la paciencia que has tenido conmigo, la ilusión compartida conmigo y las celebraciones por cada logro conseguido. ¡Te quiero mucho!

A los compañeros de la facultad que algunos se convirtieron en amigos y en una segunda familia. Con ustedes hubo risas, que me ayudaron a sobrellevar la carrera y los momentos de estrés, pero también hubo horas de estudio y trabajo. Sabemos lo difícil que fue, pero hemos conseguido llegar a donde estamos ayudándonos mutuamente. Celebro que mi segunda familia, esté donde esté, consiguiera lo que se propusiera y vayan por buen camino.

¡Esto va por ustedes!

A los profesores de la facultad, sobre todo a los pertenecientes al departamento de máquinas. Gracias por haberme guiado de cualquier manera en mi aprendizaje y hacer todos los esfuerzos posibles por dar una educación de calidad, adecuada al mundo tan complejo que nos espera, por muy difícil que fueran las circunstancias y por contarnos anécdotas que nos ayudaban a ilusionarnos cada día más con este sector.

Mención especial a Amanda Peña Navarro, tutora de este Trabajo Fin de Grado. Gracias por haberme ayudado con todo este proceso, haberme dado consejos y guiarme con la manera de desarrollarlo, sin ti me habría sido imposible sacar esto adelante.

Por último, quiero agradecer a cualquier persona que me he olvidado mencionar en estos agradecimientos o que me ha ayudado en el proceso, como la tripulación de los buques donde hice las prácticas que me ofrecieron tanto conocimiento para mi carrera profesional.

¡Muchísimas gracias a todos!

Índice del TFG

1. Introducción.....	8
2. Objetivos.....	10
3. Revisión y antecedentes.....	11
3.1. Historia de los motores de combustión interna.....	11
3.1.1. Motor de pistón de pólvora.....	11
3.1.2. Motor de Otto/Langen	12
3.1.3. Motor de Brayton	13
3.1.4. Motor de Otto.....	14
3.1.5. Motor de Clerk	14
3.2. El desarrollo del motor Diesel	15
3.3. El motor Diesel en el sector marino	16
3.4. Composición de un motor	18
3.4.1. Elementos fijos	18
3.4.1.1. Bancada	18
3.4.1.2. Bastidor	19
3.4.1.3. Cilindro	20
3.4.1.4. Culata	20
3.4.2. Elementos móviles.....	21
3.4.2.1. Válvulas de admisión y escape.....	21
3.4.2.2. Eje de camones	21
3.4.2.3. Cigüeñal	22
3.4.2.4. Pistón.....	22
3.4.2.5. Biela	23
3.4.2.6. Inyector.....	24
3.5 Motores Diésel y Otto	24

3.6. Características fundamentales de los motores Diésel.....	25
3.7. Características fundamentales de los motores Otto.....	26
3.8. Ciclos de trabajo motores Diésel.....	26
3.8.1. Motor Diésel de 4 tiempos.....	27
3.8.2. Motor Diésel de 2 tiempos.....	32
3.9. Normativa.....	35
3.9.1. Regla 13. Óxidos de Nitrógeno (NOx).....	37
3.9.2. Regla 14. Óxidos de azufre (SOx).....	38
4. Metodología.....	40
5. Resultados.....	41
5.1. Banco de pruebas.....	41
5.1.1. Potencia al freno.....	42
5.1.2. Eficiencia térmica.....	43
5.1.3. Emisiones NOx.....	44
5.1.4. Emisiones de CO.....	44
5.2. Posible aplicación en buques mercantes.....	45
5.2.1. Motor ABC 6DZC.....	47
5.2.2. Motor SULZER 3AL25/30.....	53
5.3.2. Motor MAN 8L48/60CR.....	57
6. Conclusiones.....	62
Bibliografía.....	63

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Motor de pólvora de Huygens.....	12
Ilustración 2. Motor de Otto/Langen.....	13
Ilustración 3. Motor de Brayton	13
Ilustración 4. Motor de Otto.....	14
Ilustración 5. Motor de dos tiempos de Clerk, foto real a la izquierda y diseño de la patente a la derecha.	15
Ilustración 6. Rudolf Diesel	15
Ilustración 7. Primer motor diésel, a la izquierda el diseño y a la derecha, el motor real.....	16
Ilustración 8. Motor de la gabarra ‘Petit Pierre’	17
Ilustración 9. Bancada de un motor Diesel Burmeister-Wain, tipo VF y VBF.....	19
Ilustración 10. Bastidor del motor Diésel de 4 tiempos English Electric, tipo RK/I.....	19
Ilustración 11. Culata del motor Diesel English Electric, tipo RK/V, mostrando el conjunto de las válvulas y sus mecanismos.....	20
Ilustración 12. Ejemplo de válvulas de admisión y escape de un motor.....	21
Ilustración 13. Eje de camones con rueda dentada para su accionamiento	21
Ilustración 14. Ejemplo de cigüeñal	22
Ilustración 15. Émbolo a la izquierda y aros con bulón en la derecha	23
Ilustración 16. Ejemplo de biela	23
Ilustración 17. Inyector de un motor YANMAR.....	24
Ilustración 18. Sección de un motor Otto (izquierda) y sección de un motor Diesel (derecha).	25
Ilustración 19. Ciclo de trabajo de un motor Diésel de 4 tiempos.....	27
Ilustración 20. Motor de 4 tiempos Wärtsilä 50 DF.....	28
Ilustración 21. Diagrama teórico (izquierda) y diagrama práctico (derecha) de un motor diésel de 4 tiempos atmosférico	29
Ilustración 22. Corte transversal del motor Wärtsilä 46	30
Ilustración 23. Diagrama P-V teórico, diagrama circular teórico y esquema de un motor diésel de 4 tiempos.....	31
Ilustración 24. Tiempos de un motor diésel de 2 tiempos	32

Ilustración 25. Diagrama teórico (izquierda) y diagrama práctico (derecha) de un motor diésel de 2 tiempos.....	33
Ilustración 26. Diagrama P-V teórico, diagrama circular teórico y esquema de un motor diésel de 2 tiempos.....	34
Ilustración 27. Motor Diésel marino de 2 tiempos con barrido uniflujo y válvula de escape en cabeza	35
Ilustración 28. Zonas ECA mundiales y futuras zonas ECA.....	39
Ilustración 29. Esquema del banco experimental para la inyección de agua.....	41
Ilustración 30. Gráfica de la potencia al freno (BP Kw) según la cantidad de agua inyectada (Water ratio)	42
Ilustración 31. Gráfica de la eficiencia térmica.....	43
Ilustración 32. Gráfica de las emisiones NOx según la cantidad de agua inyectada	44
Ilustración 33. Gráfica de las emisiones de CO según la cantidad de agua inyectada.....	45
Ilustración 34. Propuesta de Wärtsilä de doble inyector para la inyección de agua	46
Ilustración 35. Inyección de agua basada en common-rail.....	47
Ilustración 36. Motor ABC 6 DZC.....	47
Ilustración 37. Dimensiones del motor ABC 6DZC.....	49
Ilustración 38. Analizador de gases de escape Testo 350 MARITIME	50
Ilustración 39. Comparación de NOx antes y después de la inyección de agua	51
Ilustración 40. Comparación de CO antes y después de la inyección de agua	52
Ilustración 41. Motor SULZER 3AL25/30, en la Universidad Marítima de Gdynia	53
Ilustración 42. Universidad marítima de Gdynia, Polonia	54
Ilustración 43. Comparación de NOx antes y después de la inyección de agua	55
Ilustración 44. Comparación de las emisiones de CO, antes y después de la inyección de agua.....	56
Ilustración 45. Motor MAN 8L48/60CR	57
Ilustración 46. Dimensiones del motor MAN 8L 48/60CR	58
Ilustración 47. Analizador de gases de escape HORIBA PG-350	59
Ilustración 48. Comparación de NOx antes y después de la inyección de agua	60
Ilustración 49. Comparación de CO antes y después de la inyección de agua	61

Índice de tablas

Tabla 1. Límites de emisiones por año de construcción del buque	37
Tabla 2. Valores máximos de azufre en las zonas ECA y fuera de ellas	38
Tabla 4. Dimensiones del motor ABC 6DZC	49
Tabla 5. Emisiones de NOx según la carga del motor ABC 6DZC	50
Tabla 6. Emisiones de CO según la carga del motor ABC 6DZC	52
Tabla 7. Características del motor SULZER 3AL25/30.....	54
Tabla 8. Emisiones de NOx producidas por el motor SULZER 3AL25/30	55
Tabla 9. Emisiones de CO producidas por el motor SULZER 3AL25/30	56
Tabla 10. Características motor MAN 8L48/60CR.....	58
Tabla 11. Dimensiones del motor MAN 8L 48/60CR	59
Tabla 12. Emisiones de NOx del motor MAN 8L 48/60CR.....	60
Tabla 13. Emisiones de CO del motor MAN 8L48/60CR.....	61

RESUMEN

El presente trabajo está fundamentado en las propiedades fisicoquímicas y la capacidad refrigerante del agua pulverizada para reducir las emisiones provocadas por la combustión entre el combustible y el comburente en el interior del motor, además del posible aumento de rendimiento y potencia posterior. Es una propuesta bastante interesante para aquellos buques que necesitan reducir sus emisiones ya que puede evitar realizar obras de gran envergadura, como por ejemplo la instalación de torres de lavado o 'Scrubbers'.

Estos son elementos muy voluminosos, que se instalan por lo general en las chimeneas de los buques, colocándose en una sección de los escapes de los motores principales y requieren una instalación de tuberías de agua, válvulas y la adaptación o una nueva instalación de bombas que puedan suministrar el agua que la Scrubber necesita para lavar los gases de escape antes de expulsarlos a la atmósfera. Para el contexto de este documento se han visualizado diferentes trabajos de investigadores internacionales con certificado Creative Commons, y páginas webs de fabricantes de motores marinos como 'Wärtsilä', comparando y mostrando gráficas o conceptos que aparecen en estos trabajos a modo de argumentación.

Por último, las conclusiones más importantes son que realmente la inyección de agua en las cámaras de combustión de los motores sí que ayuda a reducir los valores NOx, entre un 60% y 80%, por ejemplo, pero donde mejores resultados se obtienen es en los motores rápidos, ya que son capaces de sobrellevar muy bien la reducción de temperatura provocada por el agua al ser inyectada en las cámaras de combustión debido a sus altas revoluciones de trabajo.

Palabras claves: Emisiones, Motor, Agua, Inyección

ABSTRACT

The present work is based on the physicochemical properties and the cooling capacity of the sprayed water to reduce the emissions caused by the combustion between the fuel and the oxidizer inside the engine, in addition to the possible increase in performance and subsequent power. It is a very interesting proposal for those ships that need to reduce their emissions and that can avoid carrying out large-scale works, such as the installation of washing towers or 'Scrubbers'.

These are very bulky elements, which are usually installed in the chimneys of ships, being placed in a section of the main engine exhausts and require an installation of water pipes, valves and adaptation or a new installation of pumps that They can supply the water that the Scrubber needs to wash the exhaust gases before expelling them to the atmosphere. For the context of this document, different works by international researchers with Creative Commons certificate, and web pages of marine engine manufacturers such as 'Wärtsilä', have been viewed, comparing and showing graphics or concepts that appear in these works by way of argumentation.

Finally, the most important conclusions are that actually the injection of water in the combustion chambers of the engines does help to reduce the NOx values, between 60% and 80%, for example, but where the best results are obtained is in fast engines, as they are able to cope very well with the reduction in temperature caused by water being injected into the combustion chambers due to their high operating revolutions.

Keywords: Emissions, Engine, Water, Injection

1. Introducción

Desde los inicios de la navegación a motor de los buques mercantes, se ha intentado buscar una optimización del consumo de combustible, para poder ahorrar en el gasto económico que supone tener en funcionamiento un motor principal durante la navegación o los motores auxiliares, para la generación de electricidad.

Gracias a los avances en las tecnologías de inyección, las turbosoplantes y en definitiva en cualquier elemento que afecte a la combustión del motor, se ha podido optimizar la combustión de los motores marinos actuales para poder alcanzar rendimientos que rondan el 50%. Pero no solo se busca la optimización de la combustión, sino también la reducción de gases contaminantes debido a las normativas cada vez más restrictivas en cuanto a los niveles de NOx y SOx, por ejemplo.

Es por ello, que se plantean soluciones como la inyección de agua en el interior de los motores diésel marinos. Esto no es un invento actual, ya que se usaba en los aviones de la Segunda Guerra Mundial para enfriar las cámaras de combustión y mejorar el rendimiento de los motores cuando fuera requerido. Además, la inyección de agua también se ha empleado en la industria automotriz para conseguir mayores rangos de potencia.

Una de las consideraciones a tener en cuenta es que el agua que se inyecta no debe ser en ningún caso agua exclusivamente, debido a la capacidad corrosiva que posee. El agua debe ser mezclada con un porcentaje de aceite para lubricar el metal de los cilindros y evitar que se produzca una corrosión inevitable de los componentes. Además, también sería apropiado incluir en esta mezcla un porcentaje de etanol para favorecer la carrera de la llama en la cámara de combustión.

La idea es inyectar el agua antes de que se produzca la inyección de combustible, para que sea ésta la que enfríe el cilindro antes de que se produzca la combustión, generando un mayor salto térmico y por consecuencia una mayor potencia y reducción de emisiones.

Es bien sabido que las normativas anticontaminación están a la orden del día. Ya lo vemos en la industria automotriz con las reducciones de emisiones tanto en motores gasolina como diésel y los intentos por llegar al cero absoluto de emisiones con los vehículos eléctricos.

Los buques de la marina mercante también se ven afectados por normativas anticontaminación, cada vez más restrictivas, que provocan la búsqueda de métodos o sistemas para poder reducir estas emisiones. Aunque está siendo cada vez más complicado reducirlas en los motores diésel, poseen el potencial de que son el tipo de motor más eficiente que se puede emplear a bordo.

Existen varios métodos para reducir las emisiones, pero la inyección de agua en las cámaras de combustión de los motores diésel resulta un método prometedor que puede llegar a ser sencillo de instalar a bordo. En general, tenemos tres formas de introducir el agua en la cámara de combustión, la primera es por medio de la emulsión del agua con el combustible antes de llegar al motor, la segunda es la pulverización del agua en el colector de admisión y la última es la inyección directa del agua en la cámara de combustión.

2. Objetivos

Con el presente trabajo se pretende dar a conocer y comprender un motor de combustión interna alternativo marino, su funcionamiento, los elementos que lo componen y la importancia de la eficiencia energética y del ahorro de combustible de estos motores para una correcta explotación del mismo a bordo de los buques.

Por tanto, es interesante el estudio y la posible aplicación de la inyección de agua en motores de combustión interna alternativos marinos, tanto en motores más antiguos como más modernos, por su posible ventaja económica frente a otras soluciones anticontaminación como las torres de lavado o 'Scrubbers'.

Para esto, se ha recurrido a la búsqueda de información en revistas dedicadas al sector, blogs de profesores, alumnos y profesionales que trabajan o estudian el mundo marino, patentes, proyectos Creative Commons y consulta de normativas aplicadas a la contaminación atmosférica de estos sistemas.

Además, se ha intentado comparar la información proporcionada por todas estas fuentes para crear un trabajo de fácil lectura y empleando imágenes para favorecer su comprensión.

3. Revisión y antecedentes

Una combustión no es más que un fenómeno químico donde un elemento combustible, como puede ser el diésel, se mezcla en condiciones adecuadas con un comburente, que es el oxígeno que contiene el aire atmosférico. [1]

Desde este punto de vista, podríamos decir que los motores de combustión interna alternativos (en adelante, MCI) no son más que unos elementos mecánicos que aprovechan la energía química de los combustibles y del oxígeno para producir calor y presión en el interior de sus cilindros y transformarlo en trabajo. [2]

Estos motores se componen de un cilindro por cuyo interior se desliza un pistón, alternativamente, que está unido a una biela y esta, a su vez, se enlaza con el cigüeñal.

El pistón se detiene momentáneamente en dos puntos extremos del movimiento alternativo, por un lado, el superior o el que está más cercano a la culata que se denomina Punto Muerto Alto (en adelante P.M.A.), también denominado Punto Muerto Superior (en adelante P.M.S.).

Por otro lado, el punto inferior o el que se encuentra más próximo al cigüeñal que se denomina Punto Muerto Bajo (en adelante P.M.B.), también llamado Punto Muerto Inferior (en adelante P.M.I.). [3]

3.1. Historia de los motores de combustión interna

Históricamente, el hombre siempre ha estado preocupado por el aprovechamiento de la energía y de los recursos para realizar de una manera más eficiente los trabajos a los que se enfrentaba diariamente.

Es por ello que, observando el pasado, se puede realizar una evolución histórica de lo que conocemos hoy en día como un motor alternativo de combustión interna.

3.1.1. Motor de pistón de pólvora

El abad, inventor y físico francés Jean de Hautefeuille, inventó en 1678 el primer motor de pistón de pólvora conocido, donde empleaba la combustión de la pólvora negra para mover un pistón en el interior de un cilindro y obtener trabajo.

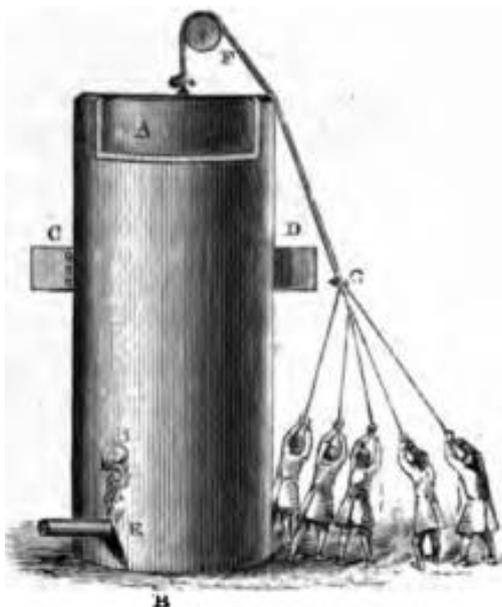
Los franceses Denis Papin y Christiaan Huygens continuaron las ideas de Hautefeuille y continuaron fabricando motores de pistón de pólvora. [4]

Estos motores, consistían en un cilindro vertical que tenía un orificio en la parte inferior por donde se introducía la pólvora y se encendía.

Un pistón era movido por la fuerza expansiva de la pólvora y los gases de escape salían por unas aperturas situadas en una zona más alta del cilindro, encargándose el pistón de descubrirlas cuando ascendía hacia la parte superior del mismo. [4]

La fuerza motriz se obtenía en el momento que se sumaban el peso del pistón y el vacío producido por los gases en enfriamiento, tirando del pistón hacia abajo. [5]

Ilustración 1. Motor de pólvora de Huygens



Fuente: <https://cursodemotos.blogspot.com/2016/03/historia-del-motor-de-combustion.html> [4]

3.1.2. Motor de Otto/Langen

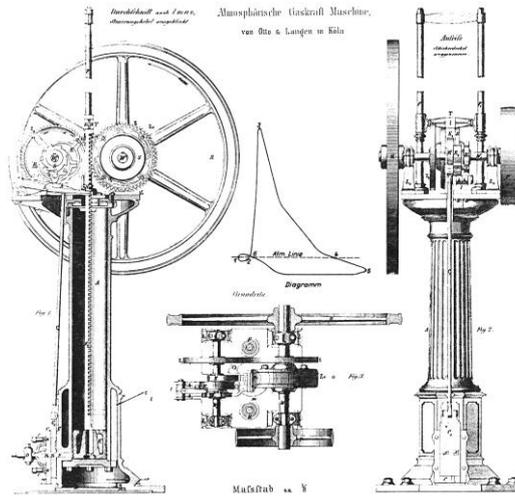
Los inventores alemanes Nikolaus Otto y su socio Eugen Langen desarrollaron un motor de pistón libre, posterior al desarrollado por Eugenio Barsanti y Felice Matteucci.

Se empleaba un volante de inercia para elevar el pistón al punto más alto del cilindro después de producir la combustión y favorecer así la entrada de una nueva carga de aire.

La llama se introducía en el cilindro por la aspiración que producía el pistón al ascender y una vez cerrada la conexión se producía la combustión.

El pistón poseía un vástago con una cremallera que, al ascender, movía el engranaje del volante de inercia, cargándose de energía y favoreciendo así el movimiento y ciclo del pistón. [6]

Ilustración 2. Motor de Otto/Langen

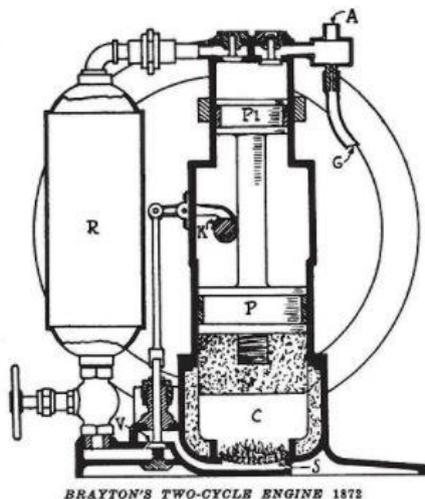


Fuente: <https://oldmachinepress.com/2018/01/20/otto-langen-atmospheric-engine/> [6]

3.1.3. Motor de Brayton

El inventor americano George Brayton desarrolla un motor alternativo de dos tiempos a presión constante y lo patenta en 1872. El motor utilizaba un cilindro con un pistón para comprimir el aire o la mezcla combustible y otro cilindro de trabajo que tenía una longitud suficiente como para producir una expansión completa de los gases de escape hasta la presión atmosférica. [7]

Ilustración 3. Motor de Brayton



Fuente: https://gaz.wiki/wiki/es/Brayton_Cycle [8]

La mezcla pasaba de un pistón a otro y se producía la combustión en el cilindro de trabajo gracias a una pequeña llama que se mantenía encendida por el flujo de mezcla combustible en by-pass. Fue un motor que se abandonó debido a sus enormes pérdidas por rozamiento y por calor. [7]

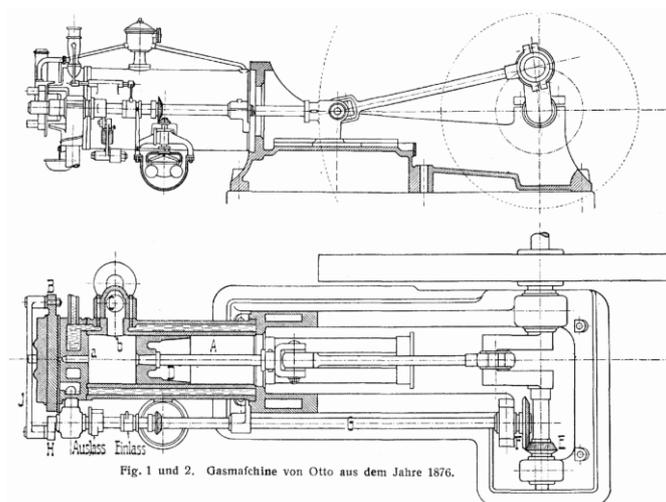
3.1.4. Motor de Otto

El primer motor de explosión de cuatro tiempos, ideado por el alemán Nicolaus Otto, tras 14 años de investigación, es el punto de inflexión en la creación de motores alternativos de combustión interna.

Se desarrolló en 1876 y empleaba una vuelta de cada dos en comprimir la mezcla de aire y combustible antes de que se produzca la ignición de la misma gracias a la chispa eléctrica que producía ya la bujía.

Además, para producir la mezcla de aire y combustible se empleaba un carburador, elemento que facilitó la dosificación con más precisión de ambos elementos. [9]

Ilustración 4. Motor de Otto



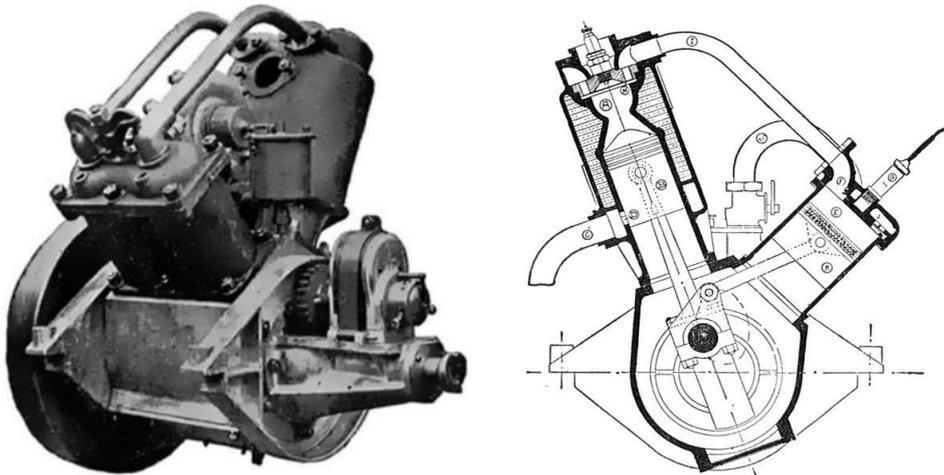
Fuente: <https://termodinamica-esimeazc.blogspot.com/2016/06/motor-otto.html> [10]

3.1.5. Motor de Clerk

Los anteriores motores, fueron desarrollados bajo un ciclo de cuatro tiempos, pero es el ingeniero escocés Dugald Clerk quien en 1878 diseñó y construyó el primer motor de dos tiempos de la historia y lo patentó en Inglaterra en 1881.

Lo diseñó modificando el motor de Brayton para que, en vez de ser una llama encendida en todo momento, una bujía produjera la chispa necesaria para la ignición de la mezcla combustible. [11]

Ilustración 5. Motor de dos tiempos de Clerk, foto real a la izquierda y diseño de la patente a la derecha.

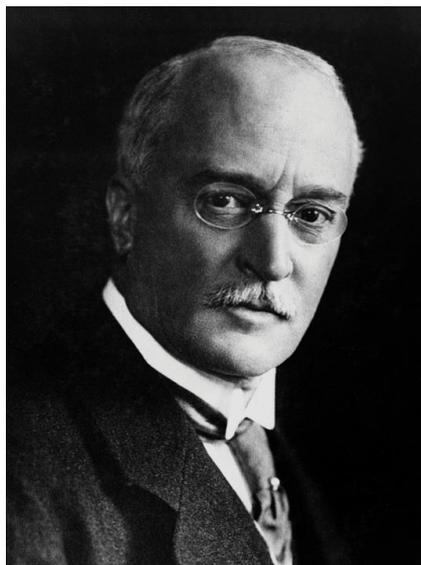


Fuente: https://revistamoto.com/wp_rm/el-motor-mas-potente-del-mundo-era-de-dos-tiempos/ [11]

3.2. El desarrollo del motor Diesel

Hasta ahora se ha hablado de motores de combustión interna alternativos que producen la combustión de la mezcla mediante una llama o una chispa eléctrica y tenemos como padre de los motores de explosión al inventor Nicolaus Otto.

Ilustración 6. Rudolf Diesel



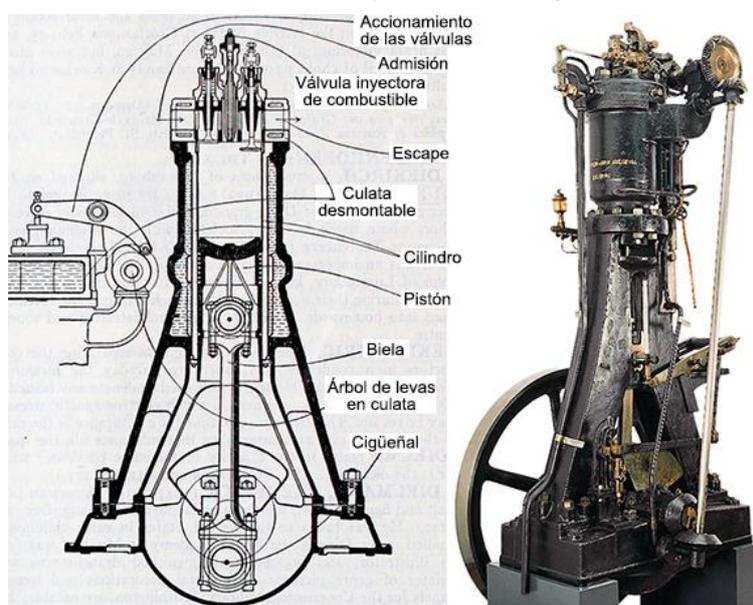
Fuente: <https://www.elblogdelaingenieria.com/rudolf-diesel-creador-del-primero-motor-diesel/> [12]

Sin embargo, la industria actual se mueve por los motores diésel, desde vehículos particulares hasta buques de gran tonelaje y se lo debemos al alemán Rudolf Diesel, nacido en 1858. Estudió ingeniería en la escuela politécnica de Munich en 1883, siendo discípulo de Carl von Linde, quien sentaría las bases del proceso termodinámico en el que se basan los frigoríficos actuales. Durante esta época, Diesel se preocupó por desarrollar un motor alternativo más eficiente que los que se estaban construyendo hasta esa época. [12]

Un gas como el aire, al ser comprimido experimenta un aumento de su energía interna y, por tanto, un aumento de su temperatura. Es por ello que Diesel propuso en 1892, separar la mezcla combustible para que el pistón comprimiera únicamente aire, dentro del cilindro, aumentando su temperatura e inyectando el combustible cuando el pistón alcanzara el Punto Muerto Superior, inflamándose el combustible en contacto con el aire caliente.

Gracias a la ayuda de las principales empresas de maquinaria industrial de la época, logró desarrollar sus ideas en 1897, iniciando la construcción del primer motor Diesel de cuatro tiempos de la historia y que logró desarrollar unos 25 caballos de vapor, ideal para trabajos pesados en las factorías. [13]

Ilustración 7. Primer motor diésel, a la izquierda el diseño y a la derecha, el motor real



Fuente: http://www.blogmecanicos.com/2018/04/historia-del-motor-diesel-parte-i_4.html [13]

3.3. El motor Diesel en el sector marino

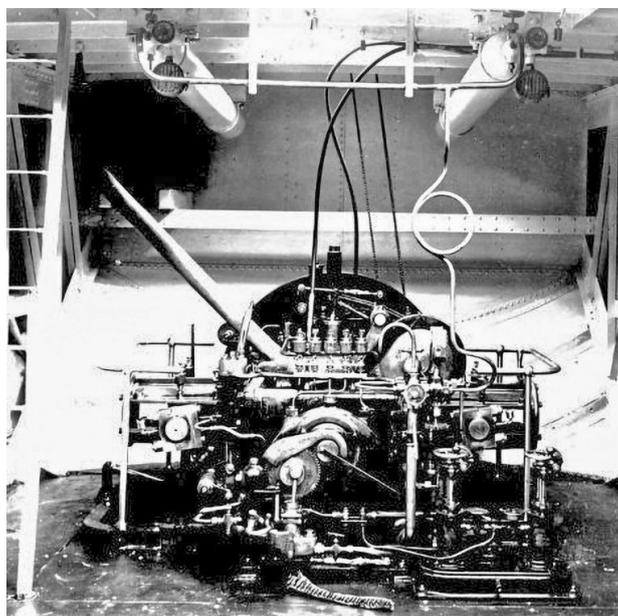
Tras haber consolidado su puesto en tierra durante varios años y haber desbancado al motor de vapor, el motor diésel logro hacerse un puesto en la industria naval.

Se habían instalado motores diésel a bordo de pequeñas embarcaciones fluviales, pero la gabarra 'Petit Pierre' es considerada la primera embarcación históricamente en emplear un motor diésel para propulsarse. Empleaba un solo motor horizontal, con pistones opuestos, que compartían el mismo cilindro, desarrollando una potencia de 25 CV a 360 rpm y que movía una única hélice con palas reversibles.

En 1903 se desarrolla la construcción del buque 'Vandal', un petrolero ruso que se considera el primer buque de gran tamaño en emplear un motor diésel para su propulsión, en concreto, tres motores diésel de tres cilindros cada uno y una potencia de 120 CV a 240 rpm. [14]

Debido a que los motores solo podían girar en un sentido de rotación, poseían un sistema que le permitía estar acoplado en marcha avante y, cuando se requería ciar la embarcación, el motor se desacoplaba y accionaba una dinamo para generar electricidad y mover un motor de corriente continua que giraba la hélice hacia el lado contrario. [15]

Ilustración 8. Motor de la gabarra 'Petit Pierre'.



Fuente: <https://www.waterwaysjournal.net/2019/11/19/the-vandal-was-the-first-diesel-electric-vessel/> [14]

A partir de aquí, se desarrollaron mecanismos en los ejes de camones de los motores para permitir la inversión de giro de los mismos, evitando el problema de tener que acoplar y

desacoplar una dinamo, para mover la hélice hacia el lado contrario. Además, se fueron desarrollando motores con mayor número de cilindros, según necesidades de potencia y gracias al tamaño cada vez más grande de los buques donde se instalaban los motores. [14]

Otro punto importante, fue la implantación del motor de dos tiempos diésel como el propuesto por Clerk en 1878 ya que se obtenía trabajo por cada vuelta de cigüeñal en vez de cada dos vueltas como sucedía con los motores de cuatro tiempos.

Según fueron pasando los años, los constructores marinos fueron desarrollando mejores, más estables y más potentes motores diésel tanto de cuatro tiempos como de dos tiempos.

Además, también se fueron desarrollando diferentes medidas de seguridad, control del motor, mejoras estructurales, resistencia de materiales, etc. Para poder llegar hasta lo que hoy tenemos a bordo de los buques de última generación, que emplean controles electrónicos de la inyección y cumplen normativas anticontaminación que no existían en las épocas de los inventores nombrados anteriormente.

3.4. Composición de un motor

Una vez vista la evolución histórica y el desarrollo de los motores, resulta de interés conocer el conjunto de elementos que constituyen, de manera general, un motor diésel marino y que se puede dividir en dos grupos, los elementos fijos y los elementos móviles.

3.4.1. Elementos fijos

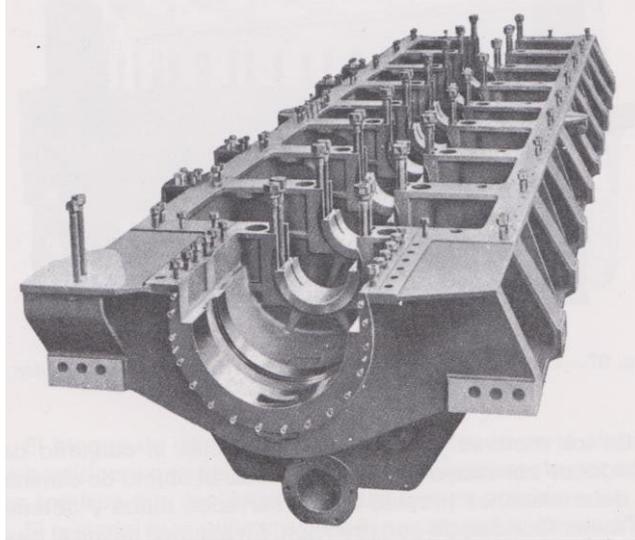
En este grupo se incluyen la cimentación del motor, la estructura en el interior de la sala de máquinas que soporta el peso del motor y las fuerzas que genera el motor, la bancada, el bastidor, los cilindros y, en general, todo aquel elemento estático que le da esa estructura y rigidez al propio motor.

3.4.1.1. Bancada

Es una pieza sólida de hierro o acero de fundición que constituye la parte más baja del motor, con sólidos tabiques transversales, para soportar las fuerzas laterales y verticales producidas en los diferentes cilindros, además de las fuerzas de torsión y la fuerza de empuje producida por la hélice y transmitida a través de su eje.

En la bancada también se instalan los cojinetes de bancada, en donde se apoya directamente el cigüeñal del motor y también sirve como recipiente colector del aceite lubricante del motor. [3]

Ilustración 9. Bancada de un motor Diesel Burmeister-Wain, tipo VF y VBF

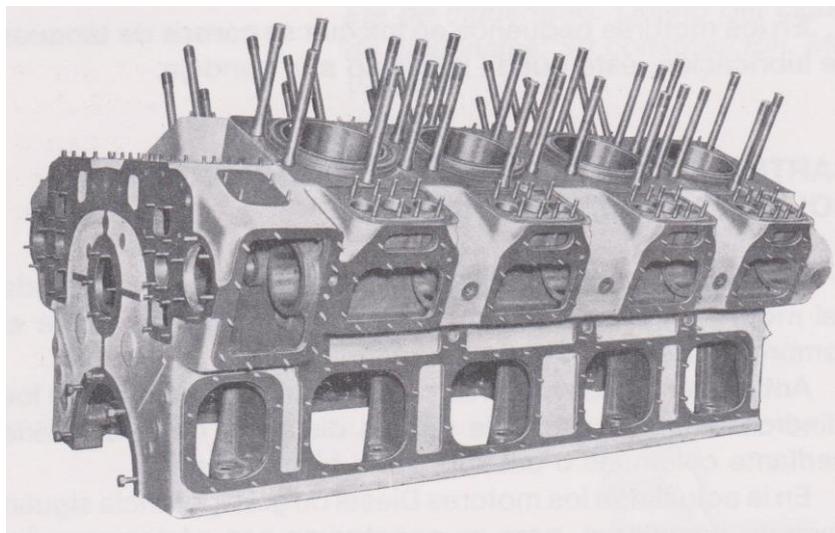


Fuente: 'Motores de Combustión Interna', D. Cabronero Mesas [3]

3.4.1.2. Bastidor

Es, de alguna manera, el cuerpo del propio motor, donde el resto de elementos se ensamblan y que soporta no solo el peso de todos esos elementos, sino también las fuerzas generadas por todo el tren alternativo y las combustiones en los cilindros. Además, va atornillado a la bancada lo que le da más rigidez al conjunto y permite amortiguar todas estas fuerzas. [3]

Ilustración 10. Bastidor del motor Diésel de 4 tiempos English Electric, tipo RK/I



Fuente: 'Motores de Combustión Interna', D. Cabronero Mesas [3]

3.4.1.3. Cilindro

Es el espacio cilíndrico del motor en cuyo interior se producen las combustiones entre el combustible y el comburente, que originan la presión necesaria en la cabeza del pistón para provocar el movimiento alternativo.

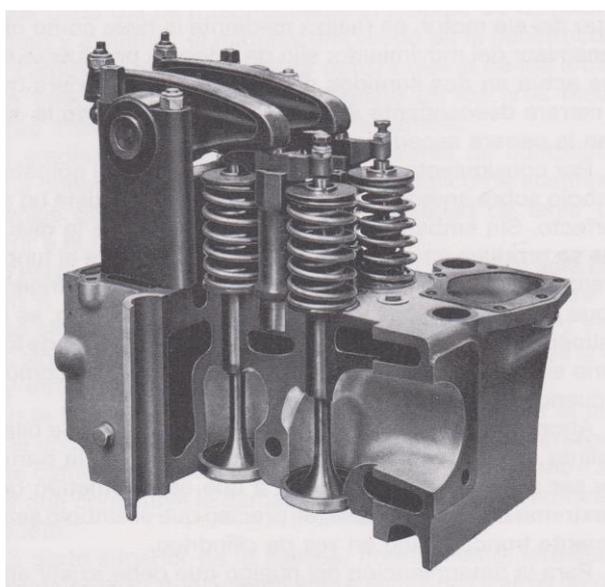
Consta de dos partes, la primera es el cilindro como tal, el espacio dentro del bastidor que permite colocar la camisa, siendo esta segunda parte la que debe soportar las altas temperaturas de las combustiones, las presiones de las mismas y los rozamientos que los aros del pistón provocan en las paredes de la camisa. [3]

3.4.1.4. Culata

Este elemento tapa, por su parte superior, el cilindro que hemos comentado antes y, generalmente, se sujeta con pernos en lo alto del bastidor, con el suficiente torque para que el conjunto pueda soportar nuevamente las presiones que se producen en el interior del cilindro.

Además, también aloja las válvulas de aspiración y escape, en el caso de los motores diésel de cuatro tiempos y la válvula de escape en el caso de los motores diésel de dos tiempos, así como los conductos de aspiración y escape, los balancines, que transmiten el movimiento a las válvulas y otros sistemas secundarios como conductos de aire comprimido de control y de arranque. [3]

Ilustración 11. Culata del motor Diesel English Electric, tipo RK/V, mostrando el conjunto de las válvulas y sus mecanismos



Fuente: 'Motores de Combustión Interna', D. Cabronero Mesas [3]

3.4.2. Elementos móviles

En este grupo se encuentran todos aquellos mecanismos y elementos que permiten realizar el ciclo de trabajo del motor, tales como el émbolo o pistón, las válvulas, la biela-manivela que permite transformar el movimiento alternativo en circular, etc.

3.4.2.1. Válvulas de admisión y escape

Son las piezas que, al accionarse mediante los balancines y empujadores, permiten la entrada de los gases que producen la combustión, la salida de los gases de escape y también, ayudan a realizar los diferentes tiempos del ciclo de trabajo.

Se encuentran ubicadas en la culata del motor y se deslizan por unas guías encajadas en unos orificios de la culata que se encargan de transmitir al metal y al agua de refrigeración, el calor producido por la combustión. [3]

Ilustración 12. Ejemplo de válvulas de admisión y escape de un motor

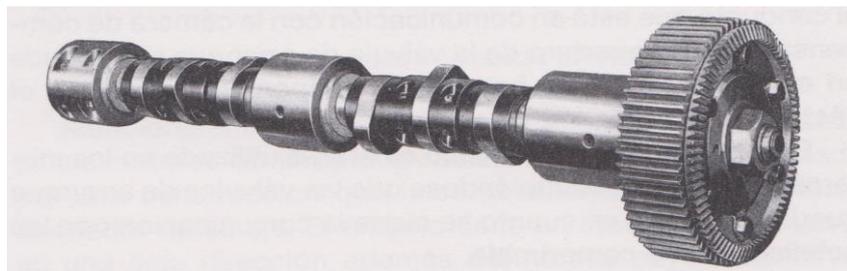


Fuente: www.atracparts.com/es/engine-valves.php [16]

3.4.2.2. Eje de camones

Se trata de un eje en el que se sitúan los camones calados a unos determinados ángulos entre si y que empujan las válvulas de aspiración y escape a través de los empujadores y los balancines, a medida que giran.

Ilustración 13. Eje de camones con rueda dentada para su accionamiento



Fuente: 'Motores de Combustión Interna', D. Cabronero Mesas [3]

El giro de este elemento, se puede realizar mediante una correa, movida por el propio cigüeñal del motor y que acciona la rueda dentada que posee el eje de camones o por medio de otras ruedas dentadas, creando un sistema de engranaje. [3]

3.4.2.3. Cigüeñal

Se trata de un eje acodado, fabricado generalmente en acero de fundición con muñones de bancada para apoyar el cigüeñal sobre la bancada del motor y con muñones de manivela para articular las cabezas de biela sobre ellos, dejando entre pieza y pieza los cojinetes de bancada y de biela, fabricados de un material más blando, para reducir la fricción entre materiales.

El cigüeñal permite transformar el movimiento alternativo del pistón en un movimiento rotativo gracias a la biela y sus articulaciones. Esta es una pieza que debe estar lo más perfectamente construido y colocado para asegurar el correcto funcionamiento del motor, ya que es el órgano que más fuerzas y presiones recibe de todo el motor, tanto estáticas como dinámicas. [3]

Ilustración 14. Ejemplo de cigüeñal



Fuente: <https://www.pinterest.es/pin/798544577667409053/> [17]

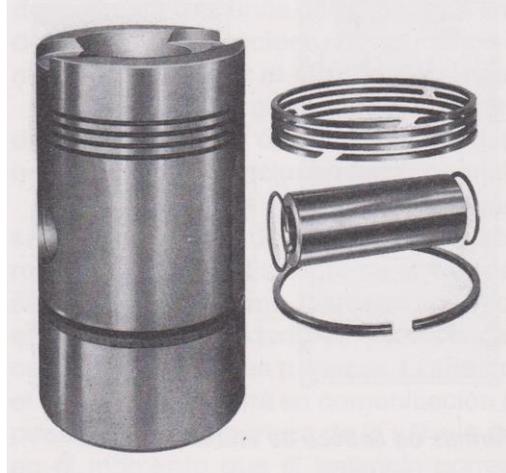
3.4.2.4. Pistón

Es la pieza móvil del motor que se aloja en el interior del cilindro y que recibe la fuerza de empuje de los gases de la combustión para moverse alternativamente por el cilindro y transmitir la fuerza hacia el cigüeñal a través de la biela.

Posee unos aros en su contorno que se encargan de sellar la cámara de combustión para evitar que los gases de escape pasen al cárter y se mezclen con el aceite, además de

distribuir una capa de aceite entre pistón y camisa, gracias a los pasos de aceite que posee el pistón. Además, un bulón es el encargado de unir el pistón a la biela y también recibe lubricación por los pasos de aceite del pistón. [3]

Ilustración 15. Émbolo a la izquierda y aros con bulón en la derecha



Fuente: 'Motores de Combustión Interna', D. Cabronero Mesas [3]

3.4.2.5. Biela

Es el órgano que se encarga de transmitir hacia el cigüeñal la fuerza que ejercen los gases de la combustión sobre el pistón. La parte de la biela que se articula al émbolo mediante un bulón se llama 'pie de biela' y la parte que se articula al cigüeñal mediante la muñequilla del cigüeñal se llama 'cabeza de biela'.

Por lo general, posee casquillos en sus articulaciones que están fabricados del mismo material blando comentado en el cigüeñal. [3]

Ilustración 16. Ejemplo de biela



Fuente: <https://www.motor.es/que-es/biela> [18]

3.4.2.6. Inyector

Aunque es un elemento que está sujeto a la culata, en su interior posee un mecanismo que se encarga de inyectar el combustible, como su propio nombre indica, en la cámara de combustión, de una manera pulverizada para así poder mezclarse lo más uniformemente posible con el aire del interior del cilindro.

El mecanismo es simple, una aguja con un muelle tarado a una presión que cierra la boquilla del inyector y evita que el combustible salga por los orificios de la boquilla. Cuando la fuerza del muelle es vencida por la presión del combustible, la aguja asciende y permite el paso del combustible a través de los orificios de la boquilla hacia la cámara de combustión.
[3]

Ilustración 17. Inyector de un motor YANMAR



Fuente: <https://es.aliexpress.com> [19]

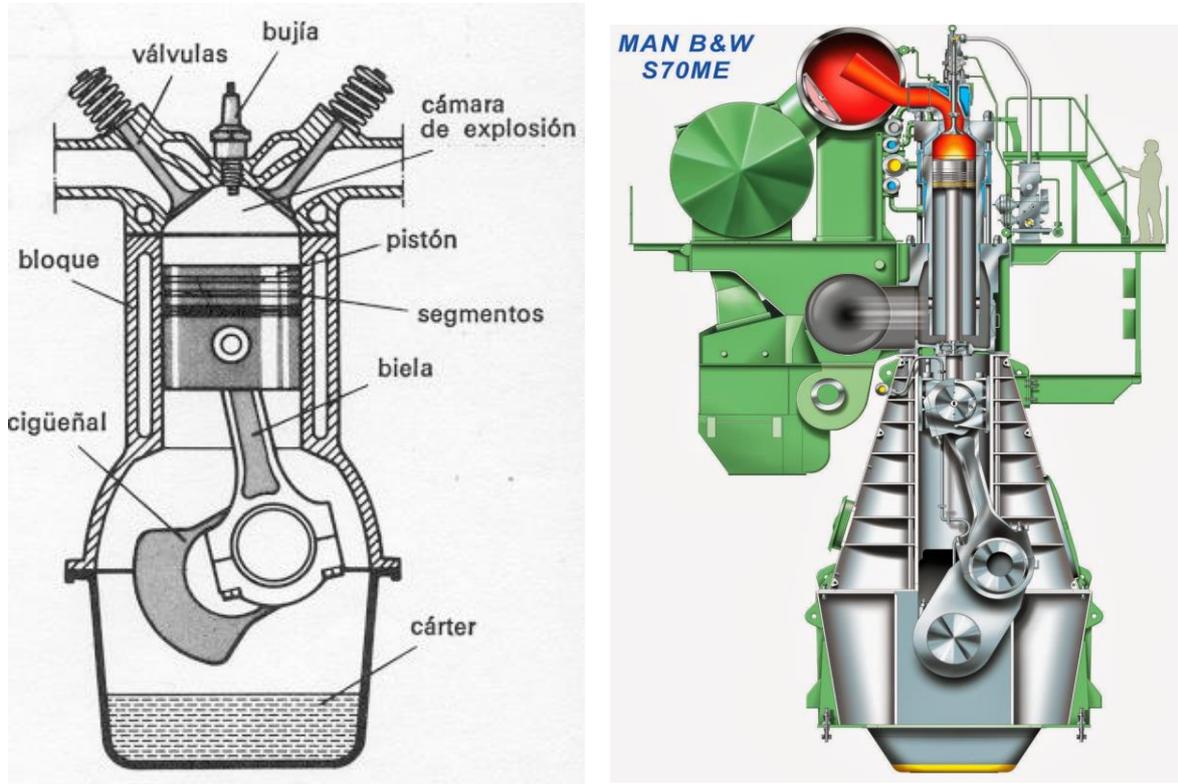
3.5 Motores Diésel y Otto

Según el proceso empleado para que se produzca la combustión en el interior de los cilindros, podríamos dividir los motores en dos tipos principales, el motor de ciclo Diésel y el motor de ciclo Otto o de explosión. Estos, a su vez, podemos dividirlos en motores de 4 y de 2 tiempos según el ciclo de trabajo que realizan.

Por un lado, los motores diésel solo comprimen el aire hasta que alcanza una temperatura suficientemente alta como para que el combustible que se inyecta, posteriormente

pueda inflamarse. Por otro lado, los motores de explosión, en su versión más antigua, comprimen una mezcla adecuada de aire y combustible realizada por un carburador y es una chispa eléctrica la que produce la explosión de la mezcla. [3]

Ilustración 18. Sección de un motor Otto (izquierda) y sección de un motor Diesel (derecha).



Fuentes: albrodpulf1.wordpress.com/2014/04/14/analisis-par-motor-torque/ [20]
http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_entrada.php?entrada_id=73 [21]

3.6. Características fundamentales de los motores Diésel

En su etapa de compresión, estos motores únicamente comprimen aire a unas relaciones de compresión de 12:1 o superior, es decir, deben estar contruidos de una manera robusta y con materiales resistentes, para soportar tales presiones.

Una de las razones que sitúan a este tipo de motor como el de mayor rendimiento, es que emplean el combustible diesel para producir la combustión siendo éste más denso que la gasolina, favoreciendo que un motor diesel se mantenga funcionando más tiempo que un motor gasolina con la misma cantidad de combustible. [3]

La combustión en el interior del cilindro se produce a presión constante, esto quiere decir, que después de la compresión del aire, se inyecta el combustible gracias a un inyector

colocado en la culata del motor y se inflama en contacto con el aire caliente, a medida que el pistón desciende, aunque esto se verá más adelante.

Además, prácticamente desde su invención, el motor diesel se ha empleado en las industrias, empleando menos piezas que un motor Otto, ya que no posee bujías, cables de bujías, distribuidor, etc. Lo que le ha dado la fama de un motor fiable, resistente y duradero. [3]

3.7. Características fundamentales de los motores Otto

Este tipo de motor, a diferencia de los diesel, se caracteriza por comprimir la mezcla combustible-comburente, en el interior del cilindro. El carburador es el encargado de producir esta mezcla gracias al efecto Venturi y se encuentra situado en la admisión del cilindro.

Este motor posee menos rendimiento que el motor diesel, al tener una menor relación de compresión, en torno a 9:1 ya que, si sometemos a la gasolina a las compresiones del motor diesel, explosionaría antes de que el pistón alcanzara el PMS y depende de la chispa producida por la bujía para producir su ignición. [3]

Debido a esto último, se entiende que el motor de gasolina produce las combustiones a volumen constante porque, como veremos más adelante, una vez que el pistón termina la carrera de compresión, la chispa de la bujía produce la ignición de la mezcla y se eleva, en ese punto, la presión dentro de la cámara de combustión sin haber comenzado a descender el pistón.

Además, como no requiere tanta resistencia como un motor diesel, suelen requerir menos empleo de materiales y ser más ligeros que estos, lo que los hace ideales para embarcaciones de recreo con motores fueraborda. Los motores Otto más modernos han sustituido el empleo de un carburador por un sistema de inyección de combustible similar al motor diesel, para mejorar su rendimiento, aunque quedan aún por debajo de los motores diesel. [3]

3.8. Ciclos de trabajo motores Diésel

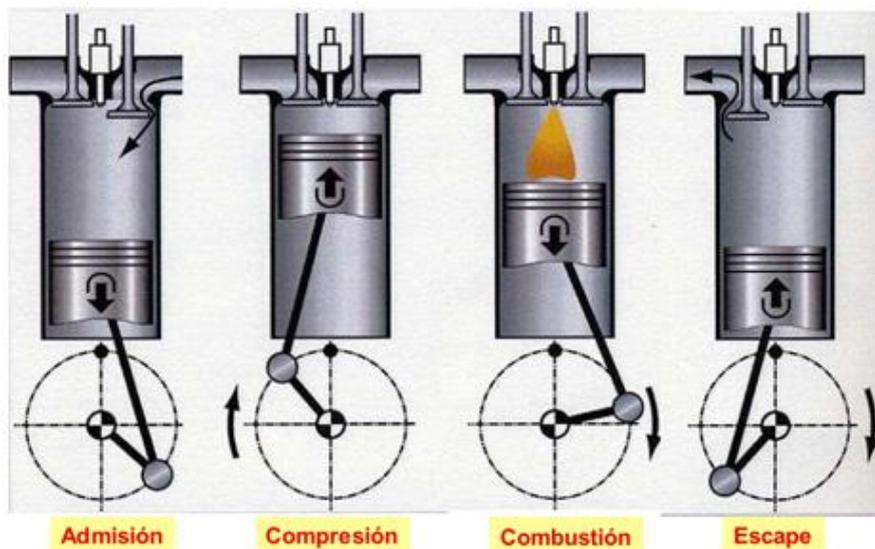
Como habíamos visto, los motores Diesel y Otto, se pueden dividir a su vez, entre motores de cuatro tiempos y motores de dos tiempos según el ciclo de trabajo que realizan, aunque en este trabajo, nos centraremos en los ciclos de trabajo del motor diesel.

3.8.1. Motor Diésel de 4 tiempos

En estos motores encontramos dos válvulas para realizar el intercambio de gases entre el interior del cilindro y el exterior, además de ayudar a la realización del ciclo del trabajo, que son, la válvula de admisión y la válvula de escape. Éstas, por lo general, se encuentran en la culata del motor y son accionadas por los ejes de camones que mueve el propio motor.

El ciclo de trabajo tiene 4 tiempos (de ahí su nombre) y se desarrollan en 720° de giro del cigüeñal o 2 vueltas completas del mismo. En la siguiente figura observamos los tiempos del ciclo de trabajo de este motor, en orden de realización de izquierda a derecha.

Ilustración 19. Ciclo de trabajo de un motor Diésel de 4 tiempos



Fuente: <https://www.tallerdemecanica.com/blog/19-correa-de-distribucion> [22]

En el primer tiempo, la válvula de admisión comienza a abrirse, accionada por el camón correspondiente, mientras la válvula de escape está cerrada y el pistón comienza su carrera descendente desde el Punto Muerto Superior (en adelante, PMS) hasta el Punto Muerto Inferior (en adelante, PMI), creando un vacío en el interior del cilindro que propicia la entrada del aire. En el segundo tiempo, la válvula de admisión comienza a cerrarse, la válvula de escape continúa cerrada y el pistón comienza a ascender de nuevo hacia el PMS para comprimir el aire del interior del cilindro. [3]

Al terminar la compresión, se produce el tercer tiempo al inyectar el combustible en la cámara de combustión, que se inflama a medida que se introduce debido a la alta temperatura

del aire comprimido. Una vez se ha producido la combustión del combustible, se genera un aumento de presión que ejerce una fuerza sobre la cabeza del pistón y lo empuja hacia el PMI, produciendo la parte de expansión del tercer tiempo.

Por último, en la siguiente carrera de ascenso del émbolo, la válvula de admisión se mantiene cerrada, la válvula de escape comienza a abrirse y los gases de escape salen del cilindro, acompañados por el pistón que los empuja al exterior del cilindro para vaciarlo y comenzar un nuevo ciclo de trabajo. [3]

Ilustración 20. Motor de 4 tiempos Wärtsilä 50 DF



Fuente: <https://tecnologia-maritima.blogspot.com/2020/01/wartsila-50-df.html> [23]

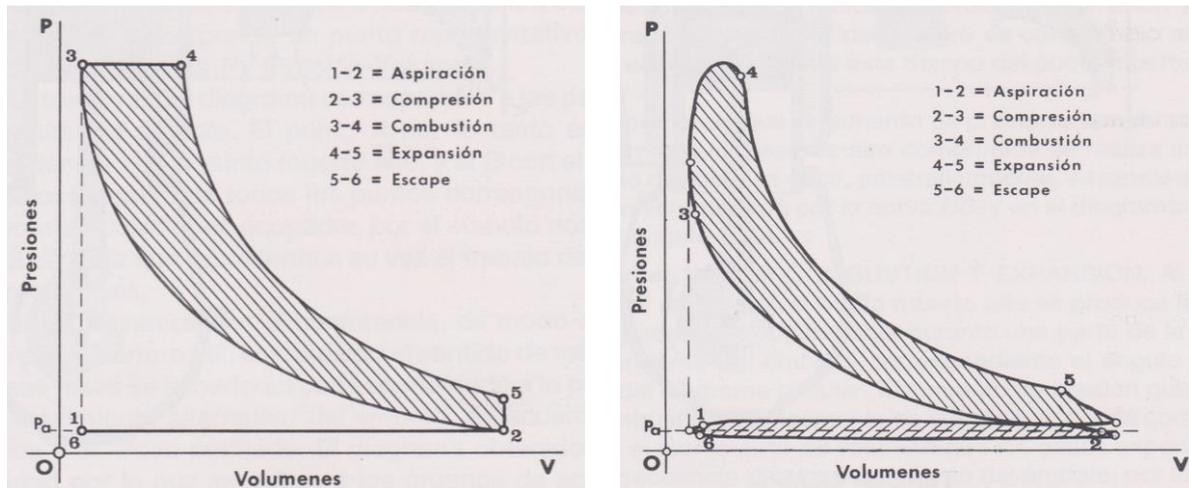
Podemos dividir un poco más estos motores de cuatro tiempos entre los que son atmosféricos y los que son sobrealimentados. En los primeros, se realiza el ciclo de trabajo con el aire atmosférico y a la presión y temperatura a la que esté ese aire.

Sin embargo, cuando es sobrealimentado, trabaja y realiza el ciclo de trabajo con un aire a una presión superior a la atmosférica.

Para lograr esto, el elemento encargado de introducir el aire a presión en el motor es la turbosoplante, que aprovecha la energía cinética de los gases de escape para hacer girar una turbina con un eje unido a otra turbina que, al comprimir el aire atmosférico, eleva la presión.

Debido a este aumento de presión, se eleva la temperatura del aire, con lo que se hace pasar a través de un enfriador o 'intercooler' que reduce la temperatura, para mejorar el rendimiento del motor y evitar sobrecalentamientos. [3]

Ilustración 21. Diagrama teórico (izquierda) y diagrama práctico (derecha) de un motor diésel de 4 tiempos atmosférico



Fuente: 'Motores de Combustión Interna', D. Cabronero Mesas [3]

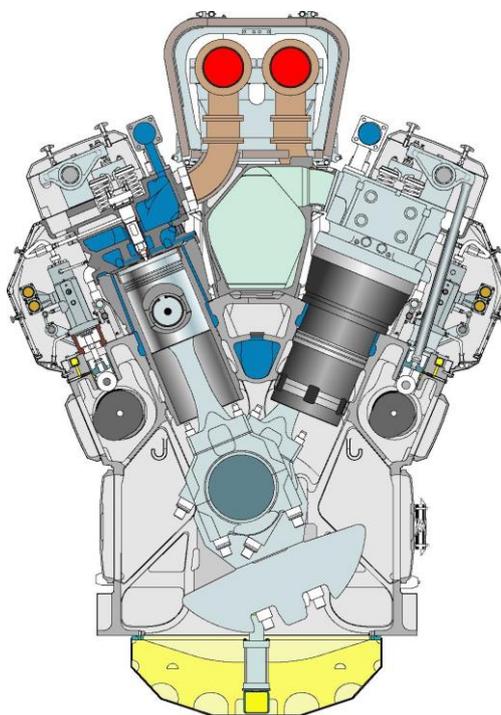
Los anteriores diagramas muestran gráficamente cómo se realiza el ciclo de trabajo de un motor diésel de 4 tiempos. En el caso de la imagen de la izquierda, se representa el motor de manera ideal, donde la transición entre tiempos del ciclo se realiza de una manera instantánea, sin tener en cuenta las pérdidas por rozamientos o las aperturas y cierres de las válvulas.

Empezando por el punto 1, la válvula de admisión se entiende que está abierta, el pistón se sitúa en el PMS y la válvula de escape está cerrada. A continuación, en el tramo del punto 1 al 2, el pistón desciende hacia el PMI, mientras la válvula de admisión continúa abierta para dejar entrar el aire y el volumen alcanza el valor máximo del cilindro, manteniéndose todo el tramo a una presión constante. [3]

Al llegar al punto 2, la válvula de admisión se cierra y el pistón comienza su carrera ascendente comprimiendo el aire hacia el punto 3, reduciendo su volumen y aumentando la presión. Justo en el punto 3, el pistón está en su PMS y es ahí donde se inyecta el combustible, que combustiona de manera instantánea, provocando el movimiento del pistón hacia el PMI, representado por el tramo 3-4.

En el punto 4, se considera que la combustión ha terminado y el pistón continúa su descenso hacia el PMI a través de la curva 4-5, llegando al punto 5 con el mismo volumen que tenía el aire en el punto 2, pero con una mayor presión debido a los gases residuales de la combustión, que ejercen esa presión extra en el interior del cilindro. En este punto, la válvula de escape abre y deja salir los gases hacia el exterior del cilindro, es por ello que vemos el salto de presión vertical desde el punto 5 al punto 2. Por último, el pistón vuelve a ascender hasta el PMS, terminando de expulsar los gases de escape y volviendo a comenzar el ciclo de trabajo. [3]

Ilustración 22. Corte transversal del motor Wärtsilä 46



Fuente: http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_entrada.php?entrada_id=48 [24]

En el diagrama de la derecha, se muestra el ciclo real o práctico del motor diésel de 4 tiempos, donde se pueden apreciar los ajustes que se les hacen a ciertos elementos del motor, como los adelantos y atrasos en la apertura y cierre de las válvulas o el adelanto de la inyección del combustible. Estos ajustes, se realizan para poder obtener un funcionamiento eficiente del motor ya que, las válvulas tardan un tiempo en realizar su función y el inyector no puede introducir, de manera instantánea, todo el combustible en el interior de la cámara de combustión. [3] Analizando el diagrama, se representa que, entre el punto 1 y el punto 2, la curva del ciclo se sitúa por debajo de la presión atmosférica, representada como 'Pa', debido al vacío que genera el pistón en su carrera descendente.

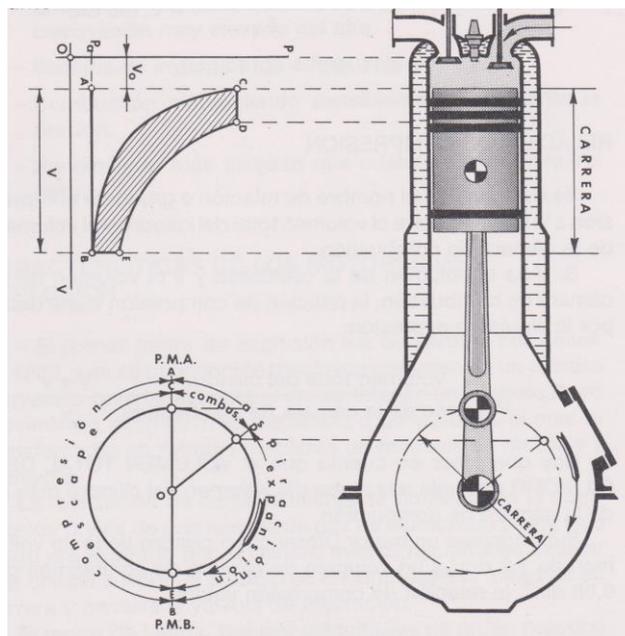
Entre el punto 2 y el punto 3, la curva es similar a la gráfica ideal, pero el punto 3 se adelanta al PMS, empezando a inyectar el combustible antes de ese momento dándole el tiempo suficiente al combustible para que pueda inflamarse.

En el momento que comienza a combustionar, la presión dentro del cilindro aumenta hasta alcanzar el punto más alto de la gráfica. Poco después de este punto, el pistón sigue su carrera descendente hacia el PMI hasta que llega al punto 4 donde la combustión ha terminado y es la presión de los gases de escape la que empuja el pistón hacia abajo, siguiendo la curva de expansión 4-5.

La siguiente diferencia con el diagrama teórico es que el punto 5 se adelanta, es decir, la apertura de la válvula de escape se adelanta para que, cuando llegue el pistón al PMI, la presión dentro del cilindro se haya reducido lo suficiente como para que el émbolo pueda ascender, nuevamente, sin ninguna restricción hasta el punto 6. En este último recorrido, la presión se mantiene por encima de la presión atmosférica hasta alcanzar el PMS donde queda igualada a la atmosférica. [3]

Para poder visualizar de una manera más clara el movimiento del pistón dentro del cilindro y la realización del ciclo de trabajo, en la siguiente imagen se muestra el diagrama del ciclo de trabajo (esquina superior izquierda), el diagrama circular (esquina inferior izquierda) que representa los tiempos del ciclo mediante los grados de giro del cigüeñal y un esquema de un motor diésel de 4 tiempos atmosférico ideal (a la derecha):

Ilustración 23. Diagrama P-V teórico, diagrama circular teórico y esquema de un motor diésel de 4 tiempos



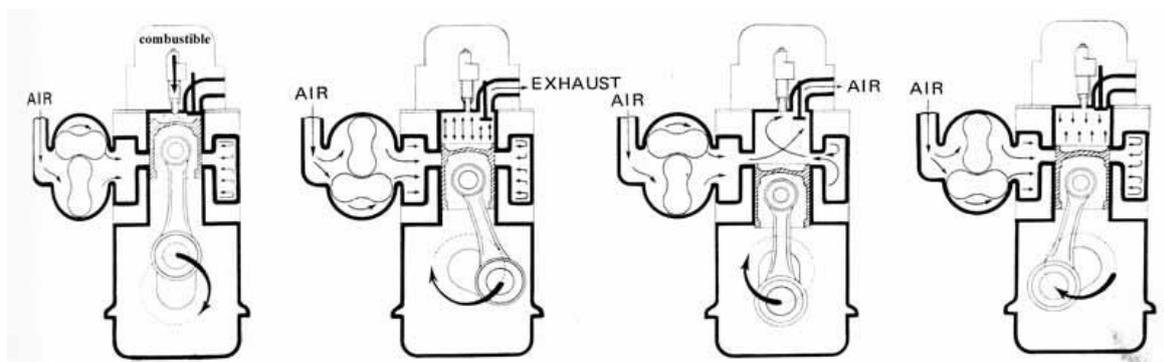
Fuente: 'Motores de Combustión Interna', D. Cabronero Mesas. [3]

3.8.2. Motor Diésel de 2 tiempos

El motor más clásico de 2 tiempos diésel es el que posee lumbreras de admisión y de escape, que son unas aperturas realizadas en el cilindro para permitir la realización del ciclo de trabajo. Además de las lumbreras, en este tipo de motor, es necesario el empleo de una turbosoplante en todo momento o de un elemento como una 'blower' que introduzca el aire de admisión a una presión mayor que la atmosférica. [3]

Este motor, a diferencia del de 4 tiempos, realiza su ciclo de trabajo en 360° de giro del cigüeñal del motor, por lo que es considerado un motor más eficiente que su hermano de 4 tiempos, ya que obtenemos trabajo en cada vuelta del motor y no cada dos vueltas.

Ilustración 24. Tiempos de un motor diésel de 2 tiempos



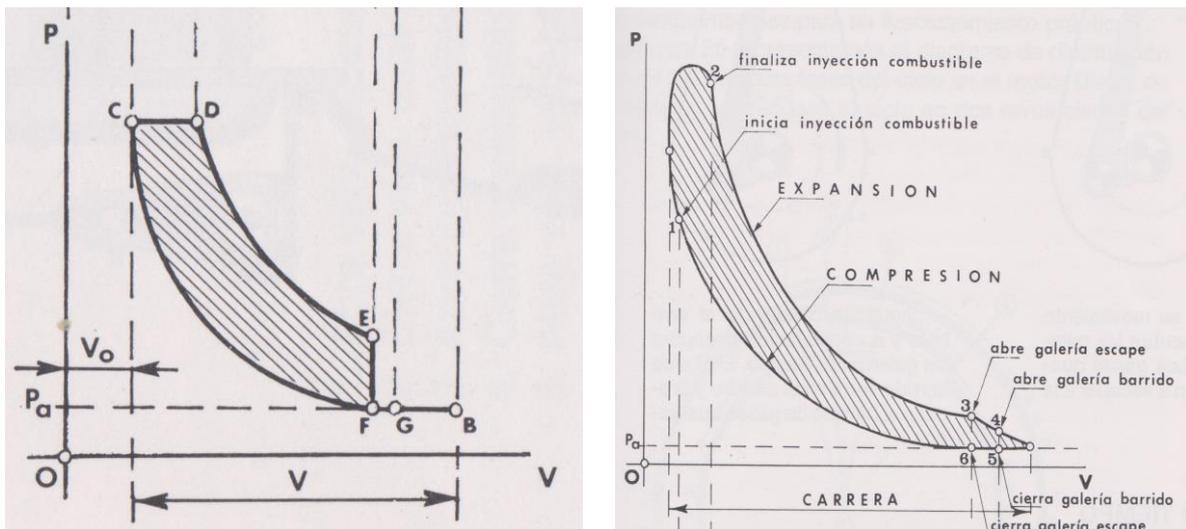
Fuente: <https://sites.google.com/a/misena.edu.co/aprendiendo-mecanica-diesel/siclo-de-funcionamiento> [25]

A diferencia del motor de 4 tiempos, el motor diésel de 2 tiempos comienza su ciclo de trabajo con un primer tiempo que comprende la combustión y expansión, el escape y el suministro de aire de barrido. El pistón, al inicio de este tiempo, se encuentra en el PMS y en la cámara de combustión se encuentra el aire comprimido por el pistón a alta temperatura. Es en este punto cuando se inyecta el combustible, que combustiona con el aire caliente produciendo una presión sobre el pistón y empujándolo hacia el PMI (expansión). [3]

En su carrera descendente, el émbolo descubre las lumbreras de escape, que son más altas que las lumbreras de admisión para favorecer la salida de los gases de escape antes de que se descubran las lumbreras de admisión. Al continuar descendiendo, el émbolo descubre las lumbreras de admisión, produciéndose el suministro de aire al interior del cilindro y el consecuente barrido, que es la renovación de los gases del cilindro por aire puro para realizar un nuevo ciclo.

A partir de este punto, comienza el segundo tiempo del ciclo de trabajo donde se finaliza el barrido, el escape de los gases y se produce la compresión del aire. Una vez el pistón ha llegado al PMI, comienza su carrera ascendente cubriendo las lumbreras de admisión y de escape para finalizar el barrido y contener aire fresco dentro del cilindro. A continuación, este aire se comprime por el ascenso del émbolo hacia el PMS, calentándolo para realizar nuevamente la combustión y realizar un nuevo ciclo de trabajo. [3]

Ilustración 25. Diagrama teórico (izquierda) y diagrama práctico (derecha) de un motor diésel de 2 tiempos



Fuente: 'Motores de Combustión Interna', D. Cabronero Mesas. [3]

Al igual que con el motor diésel de 4 tiempos, el ciclo ideal de 2 tiempos diésel se representa en la imagen de la izquierda, con cada tiempo produciéndose de una manera instantánea y sin tener en cuenta rozamientos o la cinemática de los gases.

El primer tiempo comienza a producirse en el punto C, donde el émbolo está en el PMS y el inyector introduce el combustible en la cámara de combustión produciendo la combustión, mientras el pistón se desplaza por la presión de los gases hasta el punto D, donde termina la combustión y comienza la expansión de los gases y el empuje del pistón hacia el punto E.

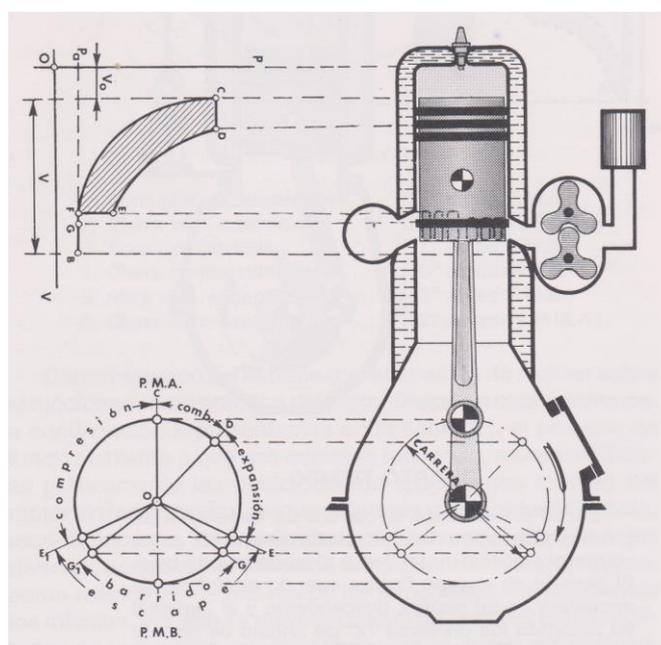
En este punto, el émbolo descubre las lumbreras de escape, produciendo el salto que se ve entre el punto E y el punto F y que, representa, al igual que en el motor de 4 tiempos, el salto de presión en el interior del cilindro. [3]

El émbolo continúa su descenso en el tramo F-G y, a partir de este punto, se descubren las lumbreras de admisión hasta el punto B, para introducir el aire de barrido al interior del

cilindro, que coincide con el PMI. A continuación, comienza el segundo tiempo, donde el émbolo asciende hasta cerrar las lumbreras de admisión y de escape comprimiendo el aire fresco hasta el punto C, representado por la curva B-C y produciéndose un nuevo ciclo de trabajo. [13]

De nuevo, para poder visualizar de una manera más clara el movimiento del pistón dentro del émbolo y la realización del ciclo de trabajo, en la siguiente imagen se muestra el diagrama del ciclo de trabajo (esquina superior izquierda), el diagrama circular (esquina inferior izquierda) que representa los tiempos del ciclo mediante los grados de giro del cigüeñal y un esquema de un motor diésel de 2 tiempos ideal (a la derecha).

Ilustración 26. Diagrama P-V teórico, diagrama circular teórico y esquema de un motor diésel de 2 tiempos



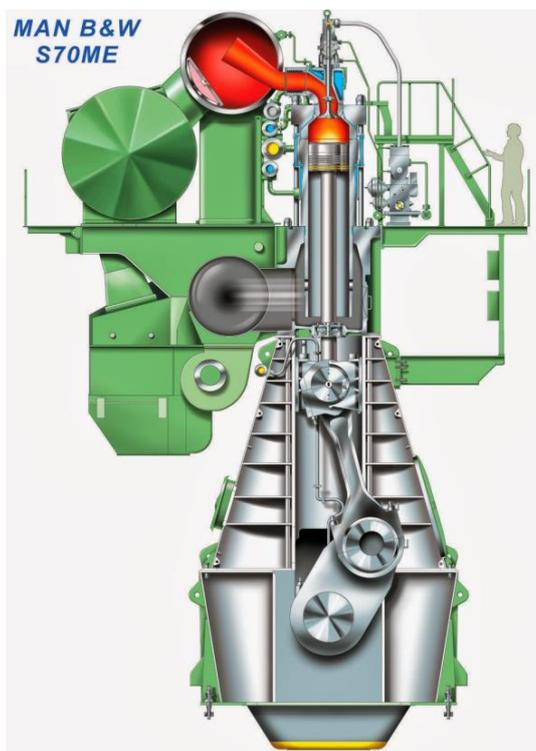
Fuente: 'Motores de Combustión Interna', D. Cabronero Mesas. [3]

En la marina mercante es muy común encontrar como máquina propulsora un motor diésel de 2 tiempos sobrealimentado con barrido uniflujo y válvula de escape en cabeza. Se trata de un motor diésel que emplea este ciclo de trabajo de 2 tiempos y sobrealimentado para introducir el aire en el interior del cilindro gracias a una turbosoplante.

Posee solo lumbreras de admisión, formando un ángulo radial para facilitar la entrada del aire en forma de torbellino y realiza un barrido uniflujo de abajo a arriba. En la culata, se encuentra una única válvula de escape accionada de manera hidráulica gracias al giro de un camón.

Además, es un motor con un cilindro mucho más alargado, con una carrera mayor y con un pistón de menor diámetro. El pistón tiene un vástago no articulado, que se une a una cruceta que se desliza arriba y abajo gracias a los patines laterales y donde se articula la biela del motor como tal. [3]

Ilustración 27. Motor Diésel marino de 2 tiempos con barrido uniflujo y válvula de escape en cabeza



Fuente: http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_entrada.php?entrada_id=73 [26]

3.9. Normativa

Debido a varios accidentes marítimos, en los que se vieron involucrados, mayoritariamente, buques petroleros y que los países se concienciaron de la necesidad de establecer una normativa internacional, de obligado cumplimiento, no solo para el diseño de los buques sino para su operativa, la Organización Marítima Internacional (OMI) desarrolló y aprobó en 1973 el 'Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques' además de aprobar los protocolos y los arbitrajes necesarios para enfrentar los sucesos de contaminación por los buques. [27]

En 1978 se modificó este convenio por el protocolo del mismo año y paso a denominarse 'Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973, modifi-

cado por el protocolo de 1978' o más conocido como 'MARPOL 73/78'. La abreviación proviene de las palabras 'MARITIME POLLUTION' (Polución Marítima, por sus siglas en inglés). [27]

A día de hoy, el convenio posee seis anexos que contienen las reglas que los buques están obligados a cumplir según las diferentes fuentes de contaminación:

1. ***“Anexo I: Reglas para prevenir la contaminación por hidrocarburos.”*** [27]
2. ***“Anexo II: Reglas para prevenir la contaminación por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel.”*** [27]
3. ***“Anexo III: Reglas para prevenir la contaminación por sustancias per-judiciales transportadas por mar en bultos.”*** [27]
4. ***“Anexo IV: Reglas para prevenir la contaminación por las aguas sucias de los buques.”*** [27]
5. ***“Anexo V: Reglas para prevenir la contaminación ocasionada por las basuras de los buques.”*** [27]
6. ***“Anexo VI: Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques.”*** [27]

En este trabajo es necesario centrarnos en el Anexo VI del MARPOL, *“Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques”*, que consta de 18 regulaciones y 6 apéndices para regular la contaminación atmosférica proveniente de los motores diésel alternativos y de las calderas. [27]

Este anexo es de aplicación para todos los buques mercantes a nivel internacional y es importante conocer las reglas en cuanto a contaminación por Óxidos de nitrógeno y por Óxidos de Azufre se refiere.

Las regulaciones de este Anexo están divididas en tres capítulos. En el primero, se definen cuatro conceptos del propio Anexo. En el segundo capítulo, encontramos la vigilancia, la certificación y el control de los tipos de contaminantes atmosféricos producidos por los sistemas de combustión a bordo, que consta de siete regulaciones.

Y, por último, en el capítulo tres, encontramos siete regulaciones más con aquellos requisitos que deben cumplir estos sistemas de combustión en cuanto a la contaminación atmosférica.

3.9.1. Regla 13. Óxidos de Nitrógeno (NOx)

Los valores de NOx y las condiciones máximas de funcionamiento que deben respetar los motores de combustión interna a bordo, están recogidos en la regla nº13 del Anexo y se aplica a:

- 1) “A todo motor diésel con una potencia de salida superior a 130 kW, instalado a bordo de un buque construido el 1 de enero del año 2000 o posteriormente” [27]
- 2) “A todo motor diésel con una potencia de salida superior a 130 kW, que haya sido objeto de una transformación importante el 1 de enero del año 2000 o posteriormente.” [27]

Y, por tanto, no es aplicable a:

- 1) “Motores de emergencia, motores instalados a bordo de botes salvavidas ni a ningún dispositivo o equipo previsto para ser utilizado únicamente en caso de emergencia” [27]
- 2) “A los motores instalados a bordo de buques que estén solamente dedicados a realizar viajes dentro de las aguas sometidas a la soberanía o jurisdicción del Estado cuyo pabellón están autorizados a enarbolar, a condición de que tales motores estén sometidos a otra medida de control de los NOx establecida por la Administración.” [27]

En definitiva, cualquier motor diésel empleado en las salas de máquinas para generación de electricidad, propulsión o cualquier otro fin, se le debe aplicar las reglas del presente Anexo.

En el apartado 3 de esta regla se expresan los valores de NOx máximos que deben tener los motores durante su funcionamiento y la prohibición de su arranque en caso de incumplimiento de los mismos:

Tabla 1. Límites de emisiones por año de construcción del buque

Tier	Año de construcción del buque o posterior	Límite total de emisiones por ciclo (g/kWh), siendo 'n' las rpm		
		$n < 130$	$130 > n < 2000$	$n \geq 2000$
I	1 de Enero del 2000	17	$45 \cdot n^{-0.2}$	9,8
II	1 de Enero del 2011	14,4	$44 \cdot n^{-0.23}$	7,7
III	1 de Enero del 2016	3,4	$9 \cdot n^{-0.2}$	2

Fuente: Convenio MARPOL 73/78 [27]

Elaboración propia

Este apartado también especifica que se podrá permitir el arranque de los motores en caso que:

1. “El motor consta de un sistema de limpieza de los gases de escape, aprobado por la Administración de conformidad con lo dispuesto en el Código Técnico sobre los NOx [...]” [27]
2. “O se utiliza cualquier otro método equivalente, aprobado por la Administración teniendo en cuenta las directrices pertinentes que elabore la Organización [...]” [27]

3.9.2. Regla 14. Óxidos de azufre (SOx)

Los SOx llegan a ser peligrosos en el aire porque, entre otras razones, cuando se expulsa a la atmósfera, reacciona con las temperaturas más bajas y la humedad del ambiente, dando como resultado H₂SO₄, es decir, ácido sulfúrico.

Es por ello, que en la siguiente tabla se representan los valores máximos que deben tener en cuenta los buques a partir del 1 de enero de 2020 pero también se representan los valores establecidos de otros años.

Tabla 2. Valores máximos de azufre en las zonas ECA y fuera de ellas

Fuera de una zona ECA	En una zona ECA
4,50% masa/masa antes del 1 de Enero de 2012	1,50% masa/masa antes del 1 de Julio de 2010
3,50% masa/masa a partir del 1 de Enero de 2012	1,00% masa/masa a partir del 1 de Julio de 2010
0,50% masa/masa a partir del 1 de Enero de 2020	0,10% masa/masa a partir del 1 de Enero de 2015

Fuente: Convenio MARPOL 73/78 [27]

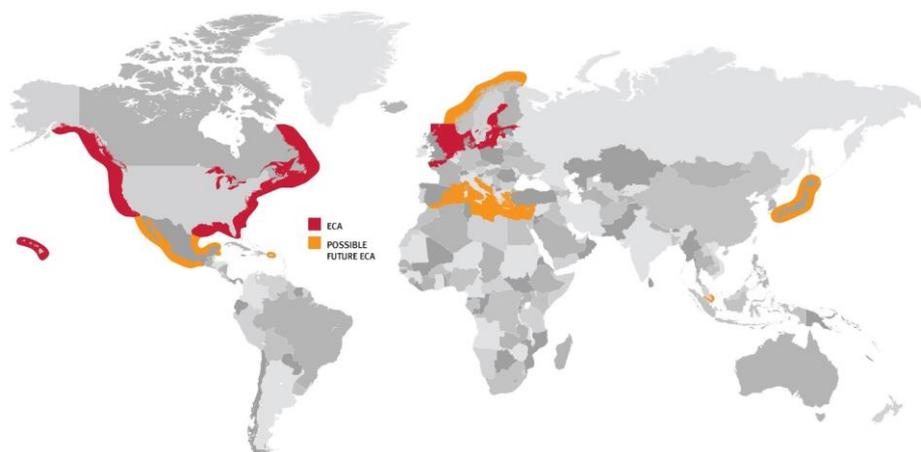
Elaboración propia

El fueloil es un combustible compuesto de varios elementos químicos y el porcentaje masa/masa expresa la cantidad de un elemento químico, en este caso el azufre que contienen 100 gramos de fueloil.

Según la norma, por cada 100 gramos de fueloil, debe haber un 4,5% de azufre como máximo. Esta primera prescripción de la norma es a nivel general para cualquier buque que navegue con fueloil.

La OMI establece unas zonas de control donde la regulación de las emisiones de SO_x es más estricta, denominadas zonas ECA:

Ilustración 28. Zonas ECA mundiales y futuras zonas ECA



Fuente: <https://ingmaritima.blogspot.com/2017/06/zonas-eca.html> [28]

En estas zonas, se ha establecido un porcentaje del 1,5% masa/masa de contenido de azufre en el fueloil empleado y, en caso de no poder realizarse, se tendrá que usar un sistema de reducción de gases contaminantes, aprobado por la Administración para mantener la emisión de SO_x por debajo de 6 gramos de SO_x/kWh. [28]

4. Metodología

La metodología aplicada en este trabajo se ha basado en la búsqueda de información en diferentes páginas webs, trabajos de profesionales del sector, consulta de normativas internacionales, trabajos Creative Commons y en libros referentes del sector marítimo.

Con toda esta información se ha intentado sintetizar y estudiar todas las posibilidades del tema a tratar, procurando introducir al lector en los motores de combustión interna alternativos y la normativa anticontaminación que deben cumplir, para poder entender con mayor facilidad el empleo de la inyección de agua en los motores y sus posibles ventajas o inconvenientes.

Además, al no poder realizar un banco de trabajo real para realizar pruebas, se ha optado por analizar los resultados procedentes de otros investigadores y realizar una comparación de pros y contras, según lo que nos proporcionan los mismos, además de estudiar su posible implantación en diferentes motores del sector.

Por último, se han insertado imágenes y tablas en todo el trabajo con el fin de afianzar la información proporcionada en cada apartado, facilitando que el lector pueda hacerse una mejor idea del tema mostrado y ayudan a que la lectura no resulta pesada.

5. Resultados

El proceso de introducir agua en los motores marinos para reducir, sobre todo, las emisiones de NO_x del motor, ha sido un punto estudiado en los últimos años para cumplir con las normativas anticontaminación cada vez más estrictas y mejorar el rendimiento de los motores [29]. De hecho, existen fabricantes de motores marinos que lo incluyen como opción dentro de su catálogo de motores.

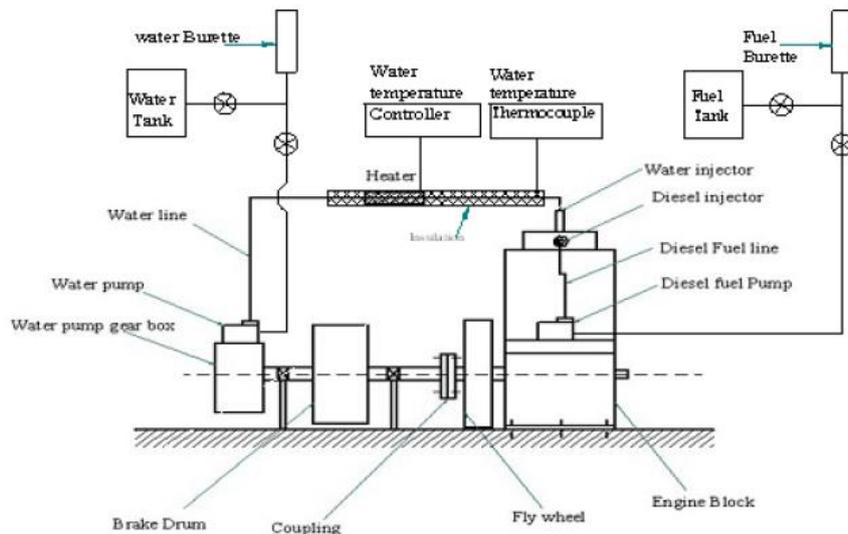
Para profundizar en el efecto de la inyección de agua en los motores diesel marinos, vamos a ver cómo se comportan tanto en un motor de dos tiempos diesel como en un motor de cuatro tiempos diésel.

5.1. Banco de pruebas

Como resultaría muy costoso realizar las pruebas con un motor marino de un tamaño similar al del Wärtsilä 20DF, por ejemplo, es indicado realizar las pruebas a una escala menor y sacar conclusiones a partir de ahí.

El siguiente esquema es de un estudio realizado por los investigadores H. Shyam Prasad, V. S. Vijay and Joseph Gonsalvi., de la St. Joseph Engineering College, en India. [29]

Ilustración 29. Esquema del banco experimental para la inyección de agua



Fuente: 'Effect of direct water injection at different crank angles on diesel engine emission and performance',
H. Shyam Prasad, V. S. Vijay and Joseph Gonsalvi [29]

Se representa en un banco de pruebas, un motor diésel de cuatro tiempos refrigerado por agua, atmosférico y mono cilíndrico con su respectivo volante de inercia, una bomba de

inyección y, en la parte superior, se intenta representar el inyector original del motor junto con un inyector de agua.

Aparece también un acople hacia un freno de tambor con objeto de aplicarle una carga al motor y, al final de este eje, una bomba de agua que aprovecha la inercia del motor para levantar la presión necesaria e introducir el agua en el cilindro.

A la salida de la bomba de agua se dispone un calentador para calentar el agua antes de entrar al motor, así se evita un choque térmico y se configura la temperatura para que el enfriamiento del cilindro sea el adecuado.

Finalmente, aparecen otros elementos en el esquema como el tanque de combustible, el tanque de agua y dos buretas para poder medir con más exactitud la cantidad de cada fluido que el motor está consumiendo. [29]

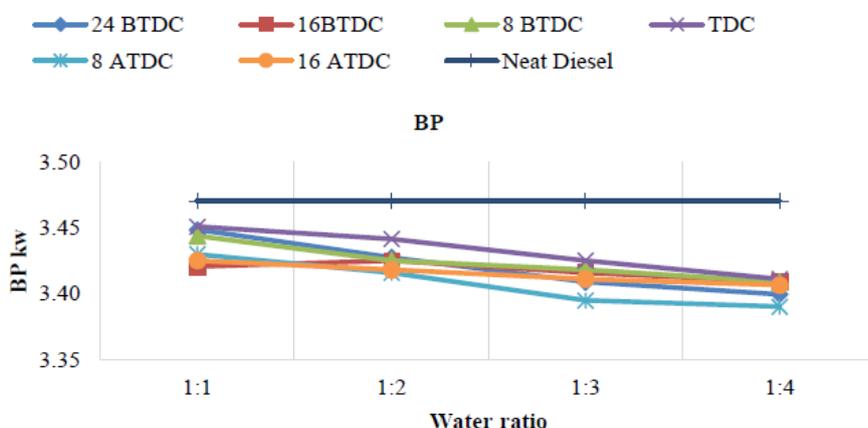
Antes de explicar el estudio, debemos conocer la definición de ‘relación diésel-agua’ que no es más que la medida de las partes de agua que inyectamos con respecto a las de diésel.

Por tanto, según esta relación podremos tener más o menos efectos sobre el motor, aunque también dependerá del tiempo de inyección de agua, ya que lo interesante es mantener constante el tiempo de inyección de combustible propio del motor y variar el tiempo de inyección del agua.

5.1.1. Potencia al freno

Observando la siguiente gráfica, encontramos que la potencia al freno es mayor si se inyecta el agua justo en el PMS (TDC). Sin embargo, es notable también que, a medida que la relación diésel-agua es mayor, el tiempo de inyección de agua es lo de menos, ya que en todos los casos la potencia disminuye con la cantidad de agua inyectada

Ilustración 30. Gráfica de la potencia al freno (BP Kw) según la cantidad de agua inyectada (Water ratio)



Fuente: ‘Effect of direct water injection at different crank angles on diesel engine emission and performance’,
H. Shyam Prasad, V. S. Vijay and Joseph Gonsalvi [29]

Podemos hacer una excepción en la relación 1:2 con el tiempo de inyección 16 grados antes del PMS (16BTDC), donde la potencia se ve incrementada con respecto a la relación 1:1 pero sigue siendo más baja que la inyección en el PMS (TDC).

Esto hace pensar que la reducción de potencia es debida a la absorción de calor que realiza el agua cuando es inyectada en el interior del cilindro y que, por tanto, podemos obtener una pérdida de potencia en la navegación, lo que conllevaría a que se tenga que inyectar más combustible para mantener una velocidad del motor lo más constante posible.

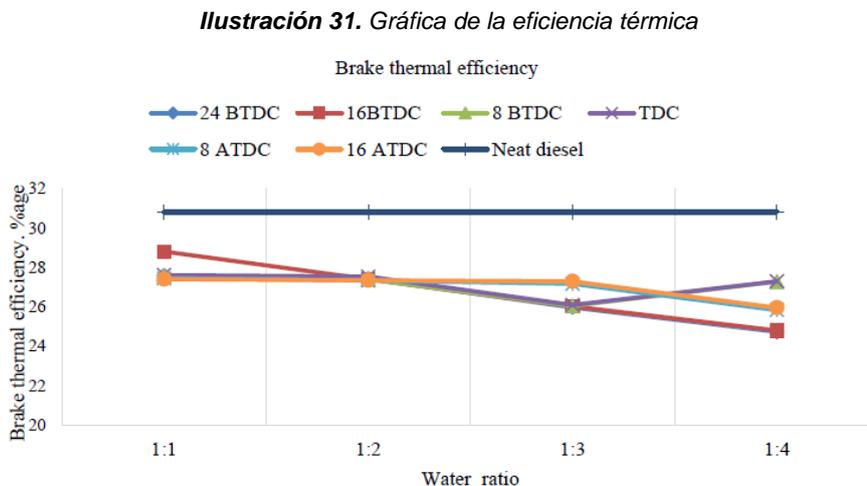
5.1.2. Eficiencia térmica

Podemos definir esta eficiencia como la diferencia que existe entre la potencia del combustible y la potencia indicada del propio motor. Es decir, el motor consume una cantidad de combustible que posee un valor calorífico conocido y en su interior, junto con el aire, produce una potencia indicada, restándole las pérdidas por rozamientos, calor o cambios de movimientos quedando una ecuación como la siguiente [29]:

$$\text{Eficiencia térmica} = \frac{\text{Potencia indicada}}{\text{Potencia combustible}}$$

Donde Potencia combustible = Poder calorífico del combustible x masa combustible consumido.

Teniendo esto, nos permite entender la siguiente gráfica que muestra la eficiencia térmica del motor con los tiempos de inyección de agua y las relaciones de diésel-agua que habíamos visto anteriormente además en comparación a la eficiencia térmica que tiene el motor en cada momento:



Fuente: 'Effect of direct water injection at different crank angles on diesel engine emission and performance',
H. Shyam Prasad, V. S. Vijay and Joseph Gonsalvi [29]

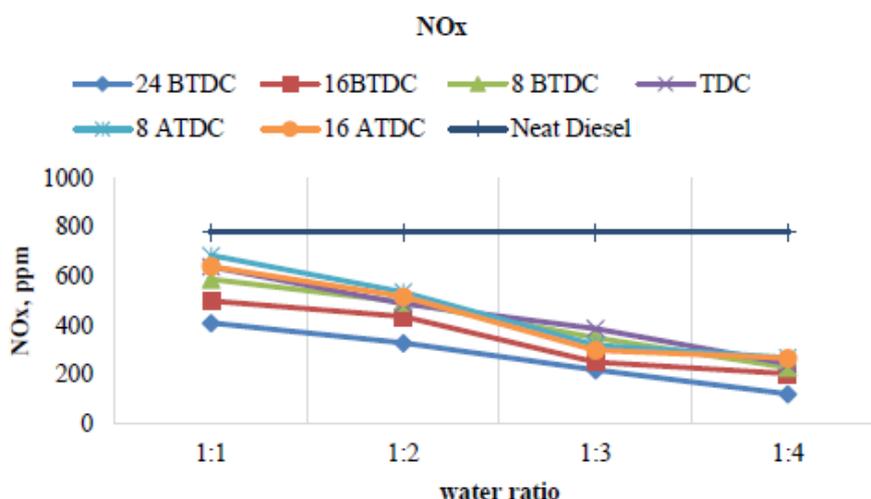
Observamos que, de nuevo, a medida que se aumenta la cantidad de agua inyectada, la eficiencia del motor disminuye en todos los casos, pero las máximas eficiencias de la gráfica las obtenemos en la relación 1:1 con la inyección a 16° antes del PMS (16BTDC) y en la relación de 1:4 con la inyección justo en el PMS (TDC).

5.1.3. Emisiones NOx

Podemos observar en la ilustración 31 que, a medida que el ratio es mayor, el nivel de emisiones de NOx se reduce. La gráfica de 8° después del PMS (8 ATDC) es la que menos partes por millón de NOx ha obtenido e incluso la que más estable se ha mantenido en todos los ratios.

Comparando esto con la gráfica de un motor diésel normal (Neat Diesel) resulta útil la inyección de agua para reducir desde 800 ppm de NOx a casi 100 ppm y poder cumplir con las normativas anticontaminación.

Ilustración 32. Gráfica de las emisiones NOx según la cantidad de agua inyectada



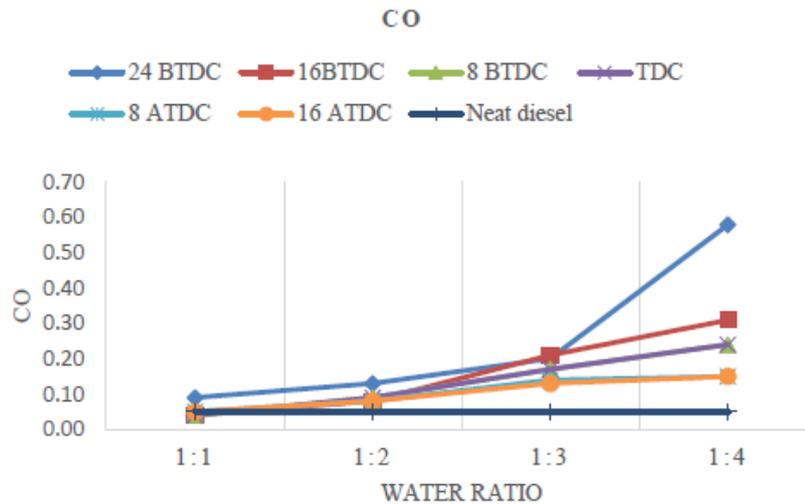
Fuente: *Effect of direct water injection at different crank angles on diesel engine emission and performance*, H. Shyam Prasad, V. S. Vijay and Joseph Gonsalvi [29]

5.1.4. Emisiones de CO

Curiosamente, es en este apartado donde la inyección de agua es desfavorable para cualquiera de los ratios y tiempos de inyección de agua.

En el apartado anterior, eran los 8° después del PMS los que tenían mejor resultado sobre las emisiones de NOx, pero en este apartado, es desfavorable ese atraso en la inyección, aunque no es el peor resultado ya que si inyectamos agua 24 grados antes del PMS (24 BTDC) obtendremos el peor resultado de todos, incrementándose los niveles de CO a partir de la ratio 1:3 de una manera abismal.

Ilustración 33. Gráfica de las emisiones de CO según la cantidad de agua inyectada



Fuente: *Effect of direct water injection at different crank angles on diesel engine emission and performance*, H. Shyam Prasad, V. S. Vijay and Joseph Gonsalvi [29]

5.2. Posible aplicación en buques mercantes

Para poder aplicar este sistema en los buques mercantes se debe realizar un análisis de viabilidad y desarrollar los posibles subsistemas o elementos que se requieren para que la inyección de agua en los motores sea posible.

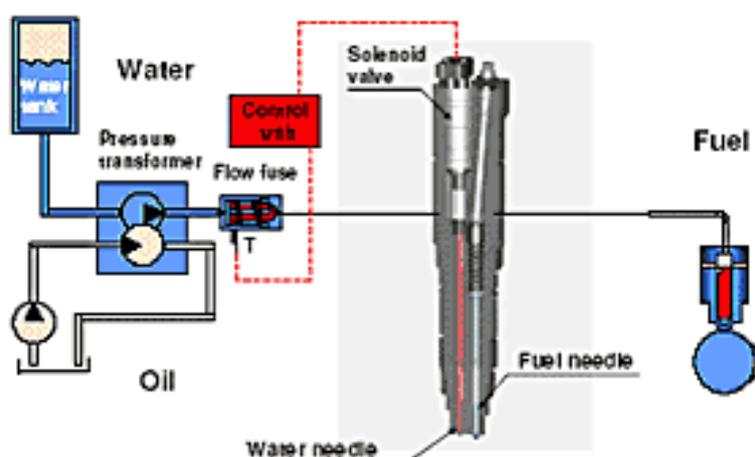
Para empezar, la inyección de agua requiere una cierta cantidad de agua que se podría proporcionar al sistema empleando los mismos generadores de agua abordo o incluyendo un sistema de generación de agua exclusivo para la inyección del motor y almacenarla en un tanque para cuando fuera requerida. El empleo de agua salada para dicha función queda descartado completamente por la capacidad altamente corrosiva que posee.

Además, para implantar el sistema en motores más antiguos o que no se fabricaron con la posibilidad de adaptar un sistema como este, sería necesario realizar un taladro en las culatas del motor para poder colocar el inyector de agua, aunque también podría colocarse el inyector en el tubo de admisión de cada cilindro para evitar taladrar las culatas.

La inyección de agua en la cámara de combustión requiere, por un lado, de una bomba de alta presión, que pueda generar una presión de entre 210 bar y 400 bar, suficiente como para que, al producirse la inyección, se pueda vencer la presión que el propio aire está ejerciendo por la compresión del pistón y se pueda introducir el agua a la cámara de combustión. [30]

También, es necesario un inyector independiente del inyector de combustible y que esté colocado directamente en la culata, para que el proceso sea todavía más eficiente. Otra opción, es que podría colocarse un inyector con doble aguja, una aguja dedicada a la inyección de agua que se acciona gracias a un solenoide y la otra aguja a la inyección de combustible que puede ser accionada por un camión, como lo que propone Wärtsilä en sus motores.

Ilustración 34. Propuesta de Wärtsilä de doble inyector para la inyección de agua



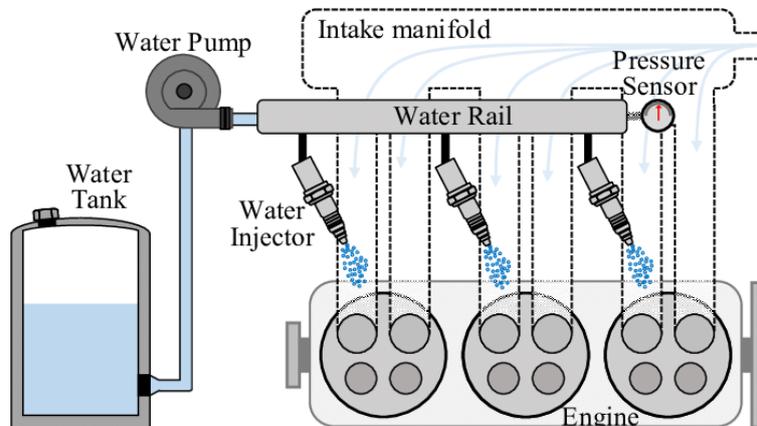
Fuente: <https://www.ip-hercules.com/modules.php?name=AvantGo&file=print&sid=14&t=c> [31]

Aparte, sería ideal tener un tanque de agua dedicado únicamente a almacenar el agua, con un calentador que pueda elevar la temperatura de la misma hasta un punto que no produzca un choque térmico en el interior de los cilindros o bien, reutilizar el calor residual de los motores que poseen estos sistemas, para calentar el agua de este tanque.

Como en la actualidad, la inyección de combustible en los motores marinos de nueva fabricación es electrónica y, generalmente con el sistema ‘common-rail’, podría emplearse el mismo sistema, pero con el agua, donde cada inyector se abra electrónicamente dependiendo de lo que dictamine la centralita y según la demanda del motor, además de poder regular el

tiempo de inyección y el atraso o adelanto de la misma. Algo similar a lo que vemos en la siguiente imagen:

Ilustración 35. Inyección de agua basada en common-rail



Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-layout-of-Port-Water-Injection-system_fig1_343758061

[32]

5.2.1. Motor ABC 6DZC

Este motor es fabricado por la empresa Anglo Belgian Corporation, una empresa situada en Gent, Bélgica, con más de 100 años de antigüedad y líder europeo en la fabricación de motores de media velocidad de entre 600 y 10400kW, tanto para industrias en tierra, producción de electricidad, locomotoras y el sector marino. [33]

Para este trabajo, estudiaremos la viabilidad de la inyección de agua en el motor ABC 6 DZC mostrado en la siguiente imagen:

Ilustración 36. Motor ABC 6 DZC



Fuente: https://www.abc-engines.com/downloads/publicity/_downloads/es/Datasheet_DZC_es.pdf [34]

Se trata de un motor de cuatro tiempos diesel de inyección de combustible, con 4 válvulas por cilindros, 2 de escape y 2 de admisión, 6 cilindros en línea, sobrealimentado, refrigerado por agua y con 10620 kg de peso.

Puede girar en sentido horario y anti horario, ideal para aplicaciones de navegación y es capaz de funcionar con cualquier combustible conocido y empleado en la industria marítima. [34]

En la siguiente tabla se representan las características del motor en la ilustración 32:

Tabla 3. Características del motor ABC 6DZC

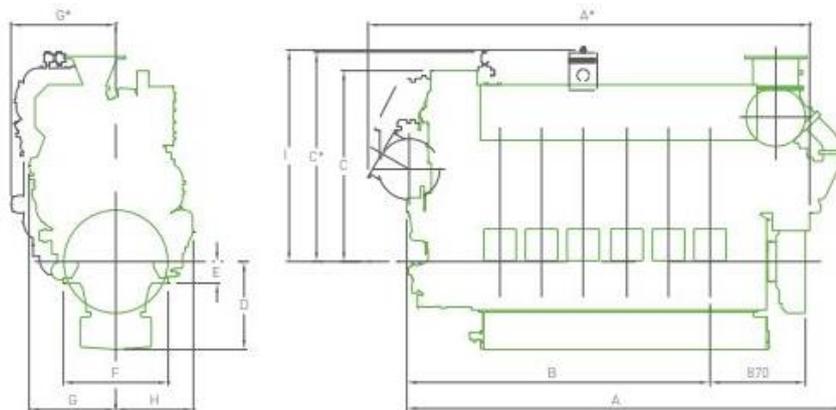
Ciclo	<i>4 tiempos, sobrealimentado</i>
Cilindros	<i>6 cilindros en línea</i>
Diámetro de cilindro	<i>256 mm</i>
Carrera	<i>310 mm</i>
Cilindrada	<i>95,7 litros</i>
Relación de compresión	<i>12,1 : 1</i>
Tipo de inyección	<i>Directa, mecánica o electrónica</i>
Presión media efectiva	<i>18,8 bar (a 1000 rpm)</i>
Velocidad del pistón	<i>10,3 m/s (a 1000 rpm)</i>

Fuente: https://www.abc-engines.com/downloads/publicity/_downloads/es/Datasheet_DZC_es.pdf [34]

Elaboración propia

Además, con idea de obtener una mejor visión de la magnitud del motor, las dimensiones se muestran a continuación en la ilustración 37, representando primeramente el diseño CAD del motor, mostrando con letras en mayúsculas las medidas del mismo. Las equivalencias entre las letras y las dimensiones se incluyen en la tabla 4.

Ilustración 37. Dimensiones del motor ABC 6DZC



Fuente: https://www.abc-engines.com/downloads/publicity/_downloads/es/Datasheet_DZC_es.pdf [34]

Tabla 4. Dimensiones del motor ABC 6DZC

6DZC	Dimensiones (mm)
A	4007
A*	4036
B	2771
C	1761
C*	1931
D (cárter seco)	508/650
D (cárter húmedo)	710/810
E	200
F	958
G	793
G*	957
H	710
I	1950

Fuente: https://www.abc-engines.com/downloads/publicity/_downloads/es/Datasheet_DZC_es.pdf [34]

Elaboración propia

Teniendo esta información en cuenta, procedemos a comparar los resultados obtenidos del estudio del motor en el banco de pruebas con este motor ABC.

Para empezar, se ha sometido a la medición de sus gases de escape con el analizador Testo 350-MARITIME. Un analizador portátil, de poco tamaño, que da la posibilidad de tomar las muestras en cualquier parte del conducto de escape y que cumple con los requisitos de la normativa MARPOL, en cuanto al código técnico para las mediciones de emisiones. [35]

Ilustración 38. Analizador de gases de escape Testo 350 MARITIME



Fuente: <https://www.testo.com/es-AR/testo-350-maritime/p/0563-3503> [35]

Para realizar el estudio de la composición de los gases procedentes de la combustión, se establecieron tres valores de potencia en los que medir los gases, cuando está al 25%, al 50% y al 75%, estableciendo también, de manera teórica, un cuarto caso donde la carga se sitúa en el 100%, obteniendo los siguientes valores de NO_x:

Tabla 5. Emisiones de NO_x según la carga del motor ABC 6DZC

Carga	25%	50%	75%	100%
Rpm	630	800	910	1000
NO_x (g/kWh)	13,290	9,63	7,74	7,04

Fuente: https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/17746/FerreiroCasti%C3%B1eira_JoseLuis_TFG_2016.pdf.pdf?sequence=2&isAllowed=y [36]

Elaboración propia

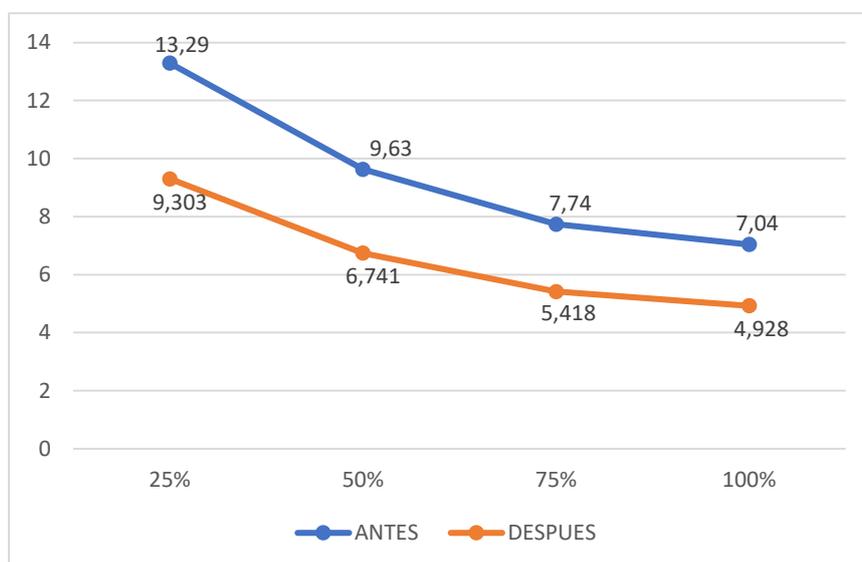
Es evidente que, al aumentar la carga del motor, aumenta la cantidad de partículas de monóxido de carbono (CO) que se emiten a la atmósfera, por el aumento de combustible inyectado que reacciona con una mayor cantidad de aire.

La cantidad de óxidos de nitrógeno (NOx) se ve disminuida al incrementar la carga ya que, con la introducción de aire a presión gracias al turbo y con el aumento de temperatura en el interior de los cilindros, se provoca una menor producción de NOx.

Con estos datos y, empleando el 100% de carga como dato de partida, sabiendo que a este régimen alcanza las 1000 rpm, este motor se podría situar en el Tier 1 de la normativa OMI. En el banco de pruebas mencionado en el apartado 5.1., la reducción de NOx en ese motor es de entre un 65% y un 80%.

Por lo tanto, vamos a aplicar a este motor ABC, de forma teórica, un 70% de reducción de emisiones de NOx a los mismos rangos de carga, quedando los nuevos valores de la siguiente manera:

Ilustración 39. Comparación de NOx antes y después de la inyección de agua



Fuente: Elaboración propia

Podemos observar que, al aplicar el porcentaje mencionado a cada medida de las emisiones, quedan reducidos los valores hasta unos límites que permitirían posicionar el motor en un Tier 2.

En cuanto a las emisiones de CO, en los mismos rangos de potencia del motor, tenemos los siguientes valores:

Tabla 6. Emisiones de CO según la carga del motor ABC 6DZC

Carga	25%	50%	75%	100%
Rpm	630	800	910	1000
CO (Kg/h)	0,150	0,440	0,840	0,923

Fuente: https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/17746/FerreiroCasti%C3%B1eira_JoseLuis_TFG_2016.pdf.pdf?sequence=2&isAllowed=y [36]

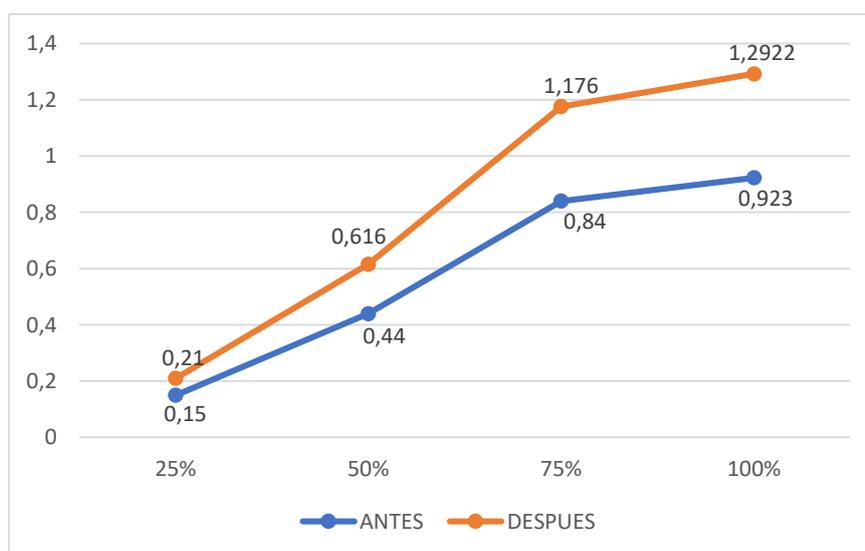
Elaboración propia

A la hora de comparar las emisiones de CO antes y después de aplicar la inyección de agua, aplicaremos el porcentaje más beneficioso para este motor, ya que en el banco de prueba con el mayor ratio diesel-agua, se alcanzó hasta un 1000% más de emisiones de CO, inyectando el agua 24 grados antes del PMS.

Por tanto, el porcentaje más favorable que podemos aplicar, aunque todos los porcentajes son desfavorables, es el perteneciente a la inyección de agua 16 grados después del PMS, donde hay un incremento de entorno al 140% de emisiones en el ratio 1:4.

Si aplicamos este porcentaje a los valores del motor ABC y los comparamos en un gráfico, quedaría como lo siguiente:

Ilustración 40. Comparación de CO antes y después de la inyección de agua



Fuente: Elaboración propia

Con estos resultados, si quisiéramos implementar la inyección de agua en este motor podríamos lograr reducir los NOx que emite hasta unos niveles suficientes como para cumplir con la normativa MARPOL Tier 2.

Sin embargo, por el ultimo gráfico, es evidente que la inyección de agua provocaría un aumento de la cantidad de CO, así que estaríamos beneficiándonos por un lado con las emisiones de NOx, pero, por otro lado, el incremento de CO sería insostenible.

5.2.2. Motor SULZER 3AL25/30

La empresa suiza Sulzer Brothers, desarrolló este motor diésel de 4 tiempos, aunque su especialidad eran los motores marinos lentos de 2 tiempos. Este es un motor con 3 cilindros que poseen 4 válvulas cada uno, 2 de admisión y 2 de escape, con inyección directa de combustible en la cámara de combustión, sobrealimentado y con intercooler.

Además, esta refrigerado por agua y no es reversible, es decir, que solo puede girar hacia un sentido con una potencia de 400 kW. Sus principales características son las siguientes:

Ilustración 41. Motor SULZER 3AL25/30, en la Universidad Marítima de Gdynia



Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Photo-of-the-SULZER-3AL25-30-piston-engine_fig1_329419842

[37]

Sus principales características son las mencionadas en la siguiente tabla:

Tabla 7. Características del motor SULZER 3AL25/30

Ciclo	4 tiempos, sobrealimentado
Número de cilindros	3 cilindros en línea
Diámetro del cilindro	250 mm
Carrera	300 mm
Cilindrada por cilindro	14,72 litros
Relación de compresión	12,7 : 1
Velocidad del pistón	7,2 m/s (a 750 rpm)
Presión efectiva del pistón	14,7 bar

Fuente: An experimental study of emission and combustion characteristics of marine diesel engine with fuel pump malfunctions, Jerzy Kowalski [38]

Elaboración propia

Se realizó un estudio de las emisiones que producía este motor con un malfuncionamiento en la bomba de combustible. Sea realizó en la Universidad Marítima de Gdynia, en Polonia, donde se encuentra un motor de este estilo para el disfrute e investigación del alumnado de la universidad. Aunque este motor perfectamente podría emplearse como propulsión de un buque pesquero o de investigación.

Ilustración 42. Universidad marítima de Gdynia, Polonia



Fuente: <https://es.dreamstime.com/imagen-editorial-el-edificio-de-la-universidad-mar%C3%ADtima-de-gdynia-en-gdynia-image57144280> [39]

Consistía en obtener los valores de las emisiones en condiciones normales de funcionamiento y compararlos con las emisiones de mal funcionamiento de la bomba de combustible, teniendo en cuenta que el motor se empleó como generador eléctrico, al tener un alternador acoplado a su eje y realizando los cálculos con la potencia eléctrica producida por el generador. [38]

Se estudiaron los efectos de este fallo en la bomba, clasificando los resultados por gráficos según fueran afectados los valores de presión máxima dentro del cilindro, la temperatura en su interior y, en cuanto a los valores de emisiones de NOx obtenidos, quedaron de la siguiente manera:

Tabla 8. Emisiones de NOx producidas por el motor SULZER 3AL25/30

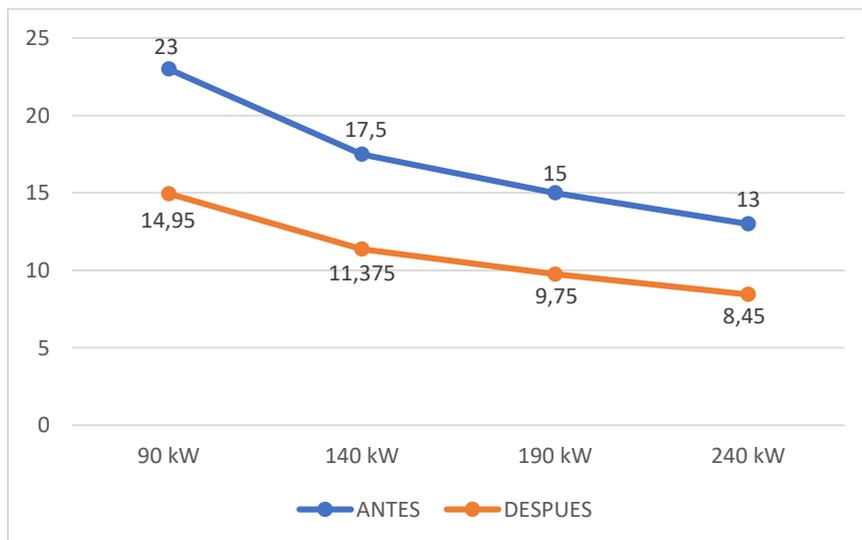
Carga	90 kW	140 kW	190 kW	240 kW
NOx (g/kWh)	23	17,5	15	13

Fuente: An experimental study of emission and combustion characteristics of marine diesel engine with fuel pump malfunctions, Jerzy Kowalski [38]

Elaboración propia

Llegados a este punto, si implementásemos la inyección de agua en este motor, aplicando de manera teórica un 65% de reducción de emisiones de NOx, como nos indica el banco de pruebas, siendo el resultado más desfavorable, quedarían los valores comparados en el siguiente gráfico:

Ilustración 43. Comparación de NOx antes y después de la inyección de agua



Fuente: Elaboración propia

El resultado, según porcentaje, sigue siendo que, a medida que se inyecta un ratio mayor de agua en el motor, la reducción de emisiones de NOx es mayor y, además, observamos que las emisiones se reducen aún más, a medida que se incrementa la carga que tiene el motor.

Con las emisiones de CO, se obtuvieron valores en los mismos rangos de potencia, quedando representados en la siguiente tabla:

Tabla 9. Emisiones de CO producidas por el motor SULZER 3AL25/30

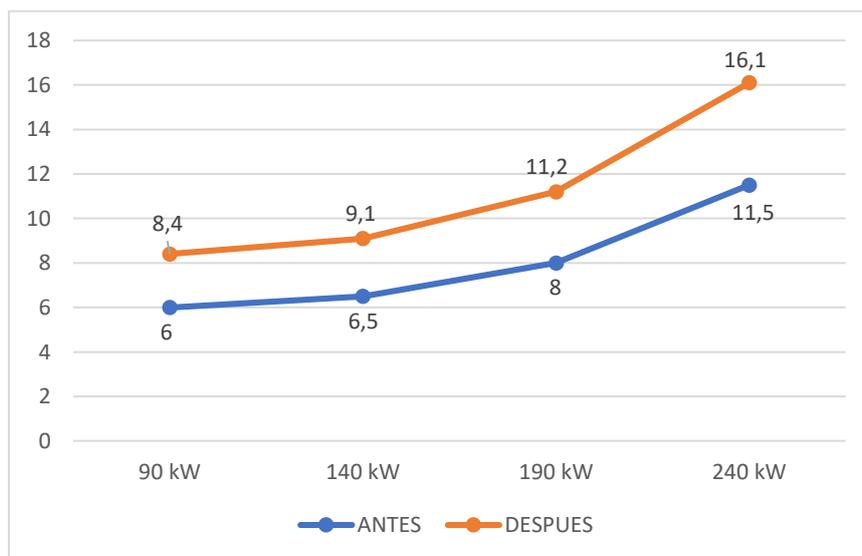
Carga	90 kW	140 kW	190 kW	240 kW
CO (g/kWh)	6	6,50	8	11,5

Fuente: An experimental study of emission and combustion characteristics of marine diesel engine with fuel pump malfunctions, Jerzy Kowalski [38]

Elaboración propia

Nuevamente, en el banco de pruebas se obtuvieron valores desfavorables de emisiones de CO con ratios altos de inyección de agua. Es por ello, que vamos a aplicar el mismo porcentaje de incremento de emisiones, un 140%, realizando la comparación antes y después de la inyección de agua en el siguiente gráfico:

Ilustración 44. Comparación de las emisiones de CO, antes y después de la inyección de agua



Fuente: Elaboración propia

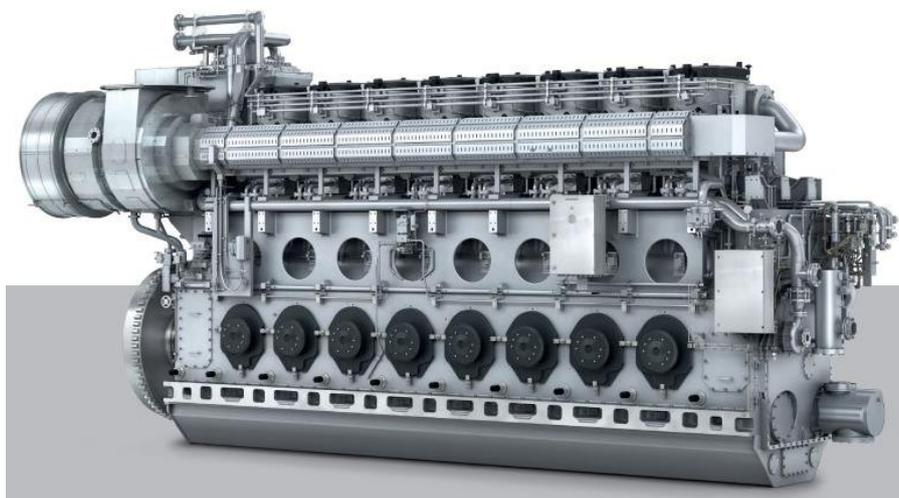
Como vemos en el gráfico, las emisiones de CO se ven incrementadas en toda la gráfica debido a la inyección de agua, lo cual, como en el anterior caso, queda más que remarcado que no es óptimo, tenemos una reducción de las emisiones de NOx y, por otro lado, un aumento de las emisiones de CO, un efecto contradictorio.

5.3.2. Motor MAN 8L48/60CR

La compañía internacional alemana MAN Diesel & Turbo, renombrada recientemente como MAN Energy Solutions, es líder en ingeniería avanzada desde hace más de 250 años, ofreciendo un amplio abanico de opciones tecnológicas. En el sector marino ha innovado durante años en motores duales, el postratamiento de gases de escape o los sistemas de propulsión híbridas, empleados sobretodo en cruceros. [40]

El motor MAN 8L48/60CR, es un producto ofrecido por MAN en su gama de motores para propulsión, cuya última versión fue desarrollada en 2018:

Ilustración 45. Motor MAN 8L48/60CR



Fuente: https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/man-es_l3_man_l48-60cr-propulsion_preview.pdf?sfvrsn=ce63aff9_8 [41]

Se trata de un motor de cuatro tiempos diesel, con 8 cilindros en línea, con inyección directa del combustible mediante un sistema common-rail electrónico. Posee 4 válvulas por cilindro, 2 de admisión y 2 de escape, es sobrealimentado con intercooler desarrollando una potencia de 9600 kW y 135.000 kg de peso, cuyas principales características técnicas son las siguientes:

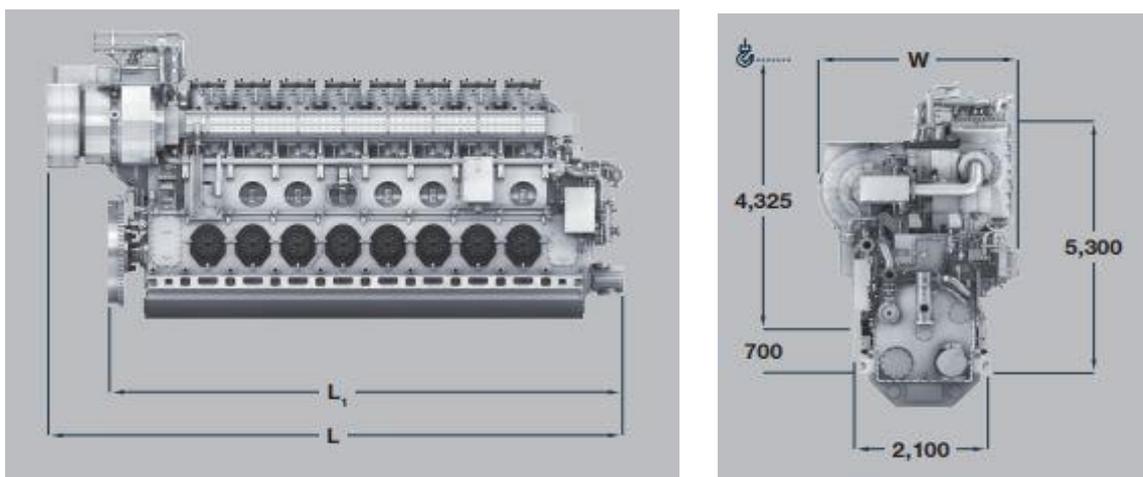
Tabla 10. Características motor MAN 8L48/60CR

Numero de cilindros	8 cilindros en línea
Diámetro del cilindro	480 mm
Carrera	600 mm
Cilindrada por cilindro	108,6 litros
Velocidad del pistón	10 m/s (a 500 rpm)
Velocidad máxima de rotación	514 rpm

Fuente: https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/man-es_l3_man_l48-60cr-propulsion_preview.pdf?sfvrsn=ce63aff9_8 [41]

En el catálogo de la compañía podemos encontrar, además de las características técnicas de la tabla 10, las dimensiones del motor expresadas en la ilustración 46 y la tabla 11, que posee los valores de las letras L, L1 y W, que ayudan a generar una mejor idea del motor que se expone:

Ilustración 46. Dimensiones del motor MAN 8L 48/60CR



Fuente: https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/man-es_l3_man_l48-60cr-propulsion_preview.pdf?sfvrsn=ce63aff9_8 [41]

Tabla 11. Dimensiones del motor MAN 8L 48/60CR

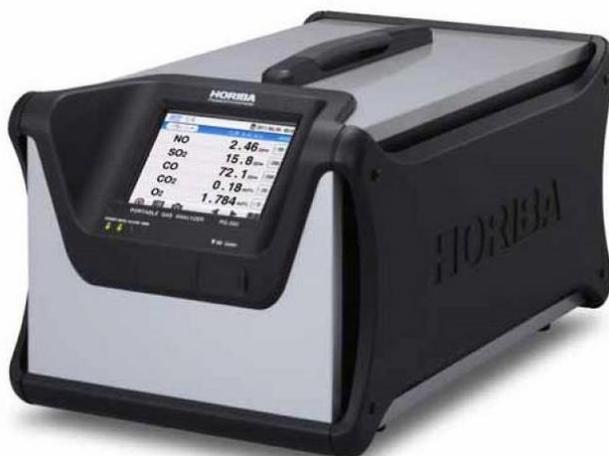
MAN 8L 48/60CR	Dimensiones (mm)
L	10540
L1	9095
W	3280

Fuente: https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/man-es_l3_man_l48-60cr-propulsion_preview.pdf?sfvrsn=ce63aff9_8 [41]

En el año 2018, en el IVL Swedish Environmental Research Institute, en Suecia, se desarrolló un proyecto que pretendía estudiar los efectos de las torres de lavado de gases de escape o 'Scrubbers' en las emisiones de gases y partículas producidas por los motores marinos, estableciendo cuatro momentos de medición, cuando el motor está al 34%, 50%, 70% y 85%. Se realizó a bordo de un buque tipo 'RoPax', cuyo nombre se ha obviado y que empleaba el mismo motor mencionado antes, como maquina propulsora del buque. [42]

Según los autores del proyecto, se empleó el analizador de gases de escape HORIBA PG-350 para la toma de muestras:

Ilustración 47. Analizador de gases de escape HORIBA PG-350



Fuente: <https://www.horiba.com/es/process-environmental/products/combustion/details/pg-350e-portable-gas-analyzer-19617/> [43]

Aunque el estudio se basa en la viabilidad de los ‘Scrubbers’ para reducir las emisiones que producen los motores marinos, se han aprovechado los datos de las emisiones producidas por el motor para su comparación con los datos generados por el banco de pruebas.

Empezando por las emisiones de NOx, tenemos los siguientes valores:

Tabla 12. Emisiones de NOx del motor MAN 8L 48/60CR

Carga	34%	50%	75%	85%
NOx (g/kWh)	15,38	11,85	9,73	11,84

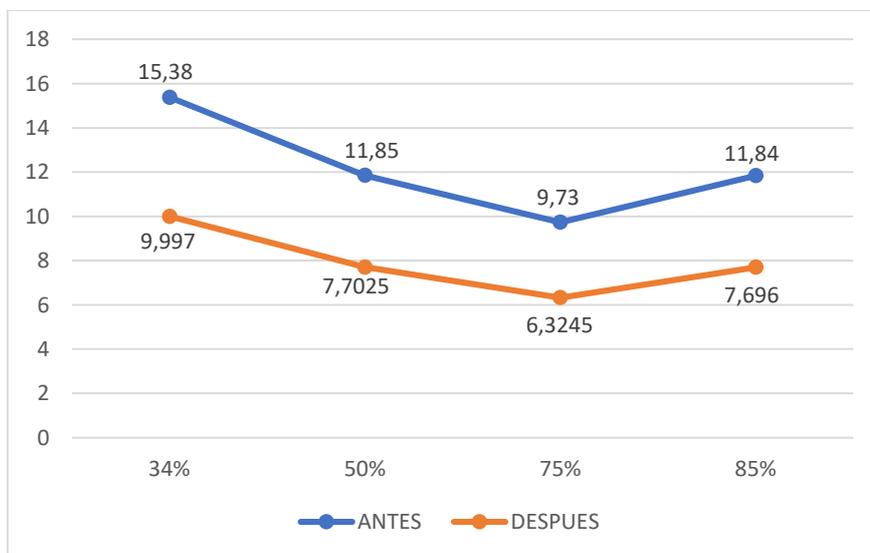
Fuente: ‘Effects of Marine Exhaust Gas Scrubbers on Gas and Particle Emissions’, Hulda Winnes, Erik Fridell and Jana Moldanová [42]

Elaboración propia

Observando estos datos, podríamos situar a este motor dentro de un Tier I, tomando las 500 rpm como valor para la clasificación. Sin embargo, con valores de carga cercanos al 75%, el valor de emisiones podría situar al motor en un Tier 2. Para comparar los posibles efectos de la inyección de agua en las emisiones del motor, aplicaremos de manera teórica un 65% de reducción sobre estas emisiones, como hicimos con el motor SULZER, manteniéndonos en el valor más desfavorable de reducción de NOx.

Los valores comparados se han representado en el siguiente gráfico:

Ilustración 48. Comparación de NOx antes y después de la inyección de agua



Fuente: Elaboración propia

Continuando la comparación, con respecto a las emisiones de CO, el motor de MAN produjo los siguientes valores:

Tabla 13. Emisiones de CO del motor MAN 8L48/60CR

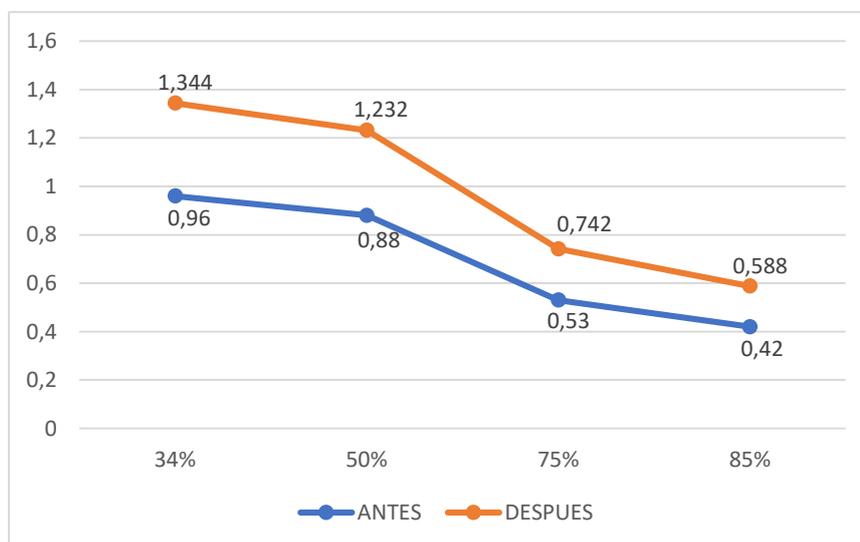
Carga	34%	50%	75%	85%
CO (g/kWh)	0,96	0,88	0,53	0,42

Fuente: Fuente: 'Effects of Marine Exhaust Gas Scrubbers on Gas and Particle Emissions', Hulda Winnes, Erik Fridell and Jana Moldanová [42]

Elaboración propia

Para este motor, debemos aplicar el porcentaje de emisiones de NOx más favorable según los valores obtenidos en el banco de pruebas, ya que todos son bastante desfavorables en la prueba. Por tanto, vamos a aplicar esta vez un porcentaje del 145% de aumento de emisiones de CO, representando los valores en el siguiente gráfico:

Ilustración 49. Comparación de CO antes y después de la inyección de agua



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, para este último motor, obtenemos que el resultado es igual que en los otros motores. Por un lado, obtenemos una reducción de NOx, que puede provocar el cambio de Tier 1 a Tier 2 aunque, por otro lado, las emisiones de CO aumentan bastante, lo que tampoco ayudaría si se pretende reducir todas las emisiones producidas por el motor.

6. Conclusiones

Vistas las gráficas del experimento y los valores obtenidos, se puede obtener que:

1. El empleo de la inyección de agua en los motores de combustión interna de cuatro tiempos de ciclo diésel para reducir emisiones es bastante deseable cuando se trata de reducir las emisiones de NOx, obteniendo los mejores resultados inyectando el agua en el PMS o 8º antes del PMS con un ratio de 1:4.
2. En el motor SULZER 3AL25/30, si las revoluciones máximas del motor, fueran las correspondientes a las mostradas en el 75% de la carga, se podría situar en un Tier 2.
3. El rendimiento de los motores puede verse reducido conforme se inyectan ratios de 1:3 o 1:4 de agua, aunque en los ratios 1:1 y 1:2 podríamos despreciar las pérdidas de rendimiento al ser tan mínimas.
4. Lo ideal para este sistema sería poseer un regulador que proporcionará la posibilidad de variar la cantidad de agua que se inyecta según la necesidad de obtener mayor o menor potencia y según los niveles de contaminación permitidos en ese momento.
5. Los valores de CO aumentan muy drásticamente a medida que el ratio de agua inyectado aumenta.
6. Hace unos años con la entrada de los Tier 1 y 2, este sistema podría haber resultado de interés, sin embargo, con las restricciones de la OMI cada vez más estrictas, se procura buscar un sistema que reduzca todas las emisiones a la vez, dejando el motor en un Tier 3 e, incluso un posible Tier 4 si la organización así lo establece.

Bibliografía

1. ROSSANA, Adrián. Combustión. *Concepto Definición*, [Blog] 8 de agosto de 2021.
<https://conceptodefinicion.de/combustion/>
2. HELLOAUTO. Motor de combustión interna. [en línea]
<https://helloauto.com/glosario/motor-de-combusti%C3%B3n-interna>
3. CABRONERO MESAS, Daniel. *Motores de Combustión Interna*, 3ª ed. Barcelona: Gráficas Benaiges, 2003.
4. ESCAMILLA, James. Historia del motor de combustión interna. *Curso de motos*, [Blog] 3 de marzo de 2016.
<https://cursodemotos.blogspot.com/2016/03/historia-del-motor-de-combustion.html>
5. CANDIDO. El motor de explosión de Huygens. *Alma de herrero*, [Blog] 19 de marzo de 2013.
<https://almadeherrero.blogspot.com/2013/03/el-motor-de-explosion-de-huygens.html>
6. WILLIAM PEARCE. *Otto-Langen Atmospheric Engine* [en línea]
oldmachinepress.com/2018/01/20/otto-langen-atmospheric-engine/
7. WILLIAM PEARCE. *Brayton Ready Motor Hydrocarbon Engine* [en línea]
<https://oldmachinepress.com/2016/12/05/brayton-ready-motor-hydrocarbon-engine/>
8. Colaboradores de GazWiki. *Ciclo de Brayton* [en línea]. GazWiki, 2021
https://gaz.wiki/wiki/es/Brayton_Cycle
9. LUIS FERNANDO BLÁZQUEZ MORALES. *Otto, Nikolaus August* [en línea]
historico.oepm.es/museovirtual/galerias_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Otto,%20Nikolaus%20August.xml
10. JERZ70. Nikolaus August Otto. *Termodinámica*, [Blog] 16 de junio de 2016
<https://termodinamica-esimeazc.blogspot.com/2016/06/motor-otto.html>
11. REVISTA MOTO. *Motor 2 tiempos: considerado el más potente del mundo* [en línea]
https://revistamoto.com/wp_rm/el-motor-mas-potente-del-mundo-era-de-dos-tiempos/
12. REDACCIÓN DE ELBLOGDELAINGENIERIA. Rudolf Diesel creador del primer motor diésel. *El blog de la ingeniería*, [Blog] 6 de febrero de 2018.
www.elblogdelaingenieria.com/rudolf-diesel-creador-del-primer-motor-diesel/

13. GARCÍA, Fran. Historia del motor diésel – Parte I. *Blog mecánicos*, [Blog] 4 de abril de 2018.
http://www.blogmecanicos.com/2018/04/historia-del-motor-diesel-parte-i_4.html
14. www.waterwaysjournal.net/2019/11/19/the-vandal-was-the-first-diesel-electric-vessel/
15. BRITA ÅSBRINK. *M/S Vandal – a historical ship* [en línea]
www.branobelhistory.com/themes/innovations/ms-vandal-a-historical-ship/
16. ATRAC ENGINE PARTS. *Válvulas del motor* [en línea]
www.atracparts.com/es/engine-valves.php
17. FREEPIK en PINTEREST. *Crankshaft Of The Diesel Engine On A White Background* [en línea]
www.pinterest.es/pin/798544577667409053/
18. MOTOR.ES. *¿Qué es una biela? Función y partes.* [en línea]
www.motor.es/que-es/biela
19. <https://es.aliexpress.com/>
20. RODRÍGUEZ, Alberto. Análisis técnico – Par motor – Torque. *AlbrodpulF1*, [Blog] 14 de abril de 2014.
albrodpulF1.wordpress.com/2014/04/14/analisis-par-motor-torque/
21. RODRIGUEZ VIDAL, Carlos. Motores diesel lentos de 2T controlados electrónicamente. *Technical Courses*, [Blog] 2 de abril de 2014.
www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_entrada.php?entrada_id=73
22. TALLER DE MECÁNICA. Correa de distribución. *Taller de mecánica*, [Blog] 4 de marzo de 2016.
<https://www.talldemecanica.com/blog/19-correa-de-distribucion>
23. RODRÍGUEZ VIDAL, Carlos. Motores Wärtsilä 50 DF. *Tecnología Marítima*, [Blog] 26 de enero de 2020.
<https://tecnologia-maritima.blogspot.com/2020/01/wartsila-50-df.html>
24. RODRÍGUEZ, Carlos; LAMAS, Isabel. Análisis CFD del periodo de barrido durante el solape de válvulas del motor diesel Wärtsilä 46. *Technical Courses*, [Blog] 9 de abril de 2014.
www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_entrada.php?entrada_id=48
25. LEANDRO, Enrique. Ciclos de funcionamiento. *Aprendiendo Mecánica Diesel*, [Blog], sin fecha de publicación.
<https://sites.google.com/a/misena.edu.co/aprendiendo-mecanica-diesel/siclo-de-funcionamiento>

26. RODRIGUEZ VIDAL, Carlos. Motores diesel lentos de 2T controlados electrónicamente. *Technical Courses*, [Blog] 2 de abril de 2014.
www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_entrada.php?entrada_id=73
27. Organización Marítima Internacional (OMI). *Convenio MARPOL 73/78*
28. AUTOR DESCONOCIDO. Zonas ECA. *IngMarítima*, [Blog] 4 de junio de 2017.
<https://ingmaritima.blogspot.com/2017/06/zonas-eca.html>
29. H, Shyam, Prasad et al 2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. **376** 012039. *Effect of direct water injection at different crank angles on diesel engine emission and performance*.
30. OFFSHORE MAGAZINE, FINLAND: *Water injection, catalytic reduction cut NOx emissions on Wartsila engines* [en línea].
<https://www.offshore-mag.com/business-briefs/equipment-engineering/article/16758918/finland-water-injection-catalytic-reduction-cut-nox-emissions-on-wartsila-engines>
31. I-P HERCULES. Workpackage 6: Emission reduction methods (internal-water) [en línea]
www.ip-hercules.com/modules.php?name=AvantGo&file=print&sid=14&t=c
32. MILLO, Federico; GULLINO, Fabrizio. *Methodological Approach for 1D Simulation of Port Water Injection for Knock Mitigation in a Turbocharged DISI Engine* [en línea].
www.researchgate.net/figure/Schematic-layout-of-Port-Water-Injection-system_fig1_343758061
33. ABC-ENGINES. *About* [en línea]
<https://www.abc-engines.com/en/about-abc-engines>
34. ABC-ENGINES. *Ficha técnica 6/8DZC* [en línea]
https://www.abc-engines.com/downloads/publicity/_downloads/es/Datasheet_DZC_es.pdf
35. TESTO. *Analizador de combustión testo 350 MARITIME – Analizador específico para motores diesel marinos*. [en línea]
<https://www.testo.com/es-ES/analizador-de-combustion-testo-350-maritime/p/0563-3503>
36. FERREIRO CASTIÑEIRA, José Luis. *Ingeniería marina: estudio de eficiencia de un motor principal* [en línea]. Trabajo fin de grado. A Coruña: Universidad Da Coruña, 2016

- ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/17746/Ferreiro-Casti%C3%B1eira_JoseLuis_TFG_2016.pdf.pdf?sequence=2&isAllowed=y
37. CUPER PRZYBYLSKA, Dominika. *Model of Processes of the AI25/30 Marine Engine and its Verification* [en línea].
https://www.researchgate.net/figure/Photo-of-the-SULZER-3AL25-30-piston-engine_fig1_329419842
38. KOWALSKI, Jerzy. An experimental study of emission and combustion characteristics of marine diesel engine with fuel pump malfunctions. *Applied Thermal Engineering* [en línea]. Gdynia: ELSEVIER, 2014, vol. 65, pp. 469-476
<https://www.sciencedirect-com.accedys2.bbt.ull.es/science/article/pii/S1359431114000349>
39. <https://es.dreamstime.com/imagen-editorial-el-edificio-de-la-universidad-mar%C3%ADtima-de-gdynia-en-gdynia-image57144280>
40. <https://www.man-es.com/company>
41. https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/man-es_I3_man_I48-60cr-propulsion_preview.pdf?sfvrsn=ce63aff9_8
42. WINNES, Hulda; FRIDELL, Erik; MOLDANOVÁ, Jana, *Effects of Marine Exhaust Gas Scrubbers on Gas and Particle Emissions* [en línea]. 24 de abril de 2020.
<https://www.mdpi.com/2077-1312/8/4/299>
43. <https://www.horiba.com/es/process-environmental/products/combustion/details/pg-350e-portable-gas-analyzer-19617/>

