

# **SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.**

**Trabajo Fin de Grado**  
Grado en Tecnologías Marinas.  
Julio de 2022

Autor:  
**Juan Manuel Padrón Cubas.**  
43833070-S

Tutores:  
Prof. Dr. D. M.<sup>a</sup> del Cristo Adrián de Ganzo.  
Prof. Dr. D. Santiago Rodríguez González.

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



Dra. D<sup>a</sup>. M.<sup>a</sup> del Cristo Adrián de Ganzo, Profesora de la UD de Ingeniería marítima, perteneciente al Departamento de Ingeniería civil, Náutica y Marítima de la Universidad de La Laguna:

Expone que:

D. **Juan Manuel Padrón Cubas** con **DNI 43833070-S** ha realizado bajo mi dirección el trabajo fin de grado titulado: **Tecnologías Marinas**.

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 30 de junio de 2022.

Fdo.: M.<sup>a</sup> del Cristo Adrián de Ganzo.

Tutora del trabajo.

Dr. D. Santiago Rodríguez González, Profesor de la UD de Ingeniería marítima, perteneciente al Departamento de Ingeniería civil, Náutica y Marítima de la Universidad de La Laguna:

Expone que:

D. **Juan Manuel Padrón Cubas** con **DNI 43833070-S** ha realizado bajo mi dirección el trabajo fin de grado titulado: **Tecnologías Marinas**.

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 30 de junio de 2022.

Fdo.: Santiago Rodríguez González.

Cotutor del trabajo.



## AGRADECIMIENTOS

---

*En muy pocas palabras quiero agradecer a mis tutores por su gran ayuda de implicación y apoyo a la hora de la realización de este trabajo, también me gustaría mencionar a dos personas muy importantes y que gracias a ellos podemos tener pruebas reales del uso de este sistema de inyección de agua. Ellos son tanto Roger por todo el conocimiento y experiencia que me ha permitido adquirir y a su familiar propietario del vehículo de pruebas por prestarse voluntario para tener unos elementos de apoyo para mi trabajo.*

*Y sin olvidar mis sinceros agradecimientos a mi novia Silvia Mora Morales que me ha apoyado muchísimo para desempeñar este TFG y, por supuesto, a mis padres que han estado apoyándome desde el minuto uno durante mi recorrido académico de manera incondicional.*

---



## RESUMEN

En este trabajo de fin de grado se va a realizar un estudio minucioso de un sistema muy poco conocido hasta el momento y que podría reducir bastante el consumo de combustible y las emisiones. Se trata del sistema de inyección de agua, mediante la prueba de un vehículo en banco de prueba con el caballaje que produce sin la inyección de agua y el que produciría con la respectiva inyección de agua, de un motor de 4 cilindros turboalimentado ubicado en las instalaciones de un vehículo en Arafo, Santa Cruz de Tenerife, cuya ubicación exacta desconocemos ya que hasta el momento es personal.

En dicho trabajo, se muestran estudios realizados por otras personas hace muchos años con motores, apreciando por medio de gráficas las grandes reducciones de emisiones que tiene un motor con tan solo llevar a cabo el sistema de inyección de agua. Se mostrará una de las últimas tecnologías desarrolladas por la marca BMW junto con Bosch de la aplicación de la inyección de agua en su fabuloso vehículo de 615cv con un elevado rendimiento y muy estricto con el medio ambiente. Vemos como esto no fue un invento de hace poco tiempo, sino que en los años 60 ya se empleaba en vehículos de carreras para dar mucha más potencia y, aún en mi búsqueda por mucha más información de este innovador sistema, como digo en la introducción de este trabajo, ya este sistema era usado en motores de aviones de la Segunda Guerra Mundial.

Este sistema no solo es aplicable a motores de gasolina sino también a motores Diesel, dado que su principal función es hacer que el motor tenga mucho más rendimiento y un menor número de emisiones y con ello reducir la contaminación del aire que respiramos.

Tras una revisión detallada de la bibliografía, podemos apreciar que el uso del sistema de inyección de agua resulta muy ventajoso, ya que su objetivo es conseguir cumplir las normativas de anticontaminación que cada día son más restrictivas y que además el precio del combustible cada vez es más elevado.

Palabras claves: Sistema de inyección de agua, motor, potencia, emisiones.



## ABSTRACT

In this end-of-degree project, a detailed study of a system that is little known until now and that could significantly reduce fuel consumption and emissions is going to be carried out. This is the water injection system, by testing a vehicle on a test bench with the horsepower it produces without water injection and the horsepower it would produce with the respective water injection, of a turbocharged 4-cylinder engine located in the installations of a vehicle in Arafo, Santa Cruz de Tenerife, whose exact location we do not know since it is personal so far.

In this work, studies carried out by other people many years ago with engines are shown, appreciating through graphs the great reductions in emissions that an engine has with just carrying out the water injection system. One of the latest technologies developed by the BMW brand together with Bosch for the application of water injection in its fabulous 615hp vehicle with high performance and very strict with the environment will be shown. We see how this was not an invention of a short time ago, but that in the 60s it was already used in racing vehicles to give much more power and, still in my search for much more information on this innovative system, as I say in the introduction of this work, this system was already used in aircraft engines of the Second World War.

This system is not only applicable to gasoline engines but also to Diesel engines, since its main function is to make the engine have much more performance and fewer emissions and thus reduce the pollution of the air we breathe.

After a detailed review of the bibliography, we can see that the use of the water injection system is very advantageous, since its objective is to achieve compliance with anti-pollution regulations that are becoming more restrictive every day and that, in addition, the price of fuel is becoming increasingly higher.

Keywords: Water injection system, engine, power, emissions.



## Índice:

<b>RESUMEN .....</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Introducción:.....</b>	<b>21</b>
<b>1.1. Antecedentes y justificación:.....</b>	<b>22</b>
<b>1.2. Modelado según la historia: .....</b>	<b>25</b>
<b>2. Objetivos:.....</b>	<b>28</b>
<b>3. Revisión y antecedentes:.....</b>	<b>30</b>
<b>3.1. Motores de combustión interna convencionales: .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1.1. Ciclo diésel de 4T o motor de cuatro carreras:.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1.1.1. Proceso de combustión Diesel: .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1.1.2. Rendimientos del Ciclo Diesel: .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1.1.3. Porcentaje térmico o de calor: .....</b>	<b>36</b>
<b>3.1.1.4. Proceso de combustión de la mezcla:.....</b>	<b>37</b>
<b>3.1.1.5. Flujo de cantidad de movimiento durante el chorro de combustible: 37</b>	<b>37</b>
<b>3.1.1.6. Chorreado de inyección por medio del flujo de la cantidad de movimiento: 39</b>	<b>39</b>
<b>3.1.2. ¿Cómo funciona un motor de gasolina?: .....</b>	<b>40</b>
<b>3.1.2.1. Motor de gasolina de 4T convencional:.....</b>	<b>41</b>
<b>3.1.2.2. Motor de gasolina de 2T convencional:.....</b>	<b>42</b>
<b>3.1.2.2.1. Proceso de admisión de motor de gasolina de 4T convencional: 43</b>	<b>43</b>
<b>3.1.2.2.2. Proceso de compresión del motor de gasolina de 4T convencional: 44</b>	<b>44</b>
<b>3.1.2.2.3. Proceso de ignición de mezcla del motor de gasolina de 4T: 45</b>	<b>45</b>
<b>3.1.2.2.4. Expulsión de gases del motor de gasolina de 4T:.....</b>	<b>46</b>
<b>3.2. Uso de motores MEC y MEP con inyección de agua:.....</b>	<b>46</b>

<b>4.</b>	<b>Material y metodología:</b> .....	49
<b>4.1.</b>	<b>Material:</b> .....	49
	<b>4.1.2. Características del Renault 5 GT Turbo:</b> .....	49
	<b>4.1.3. Características del motor “C1J” del Renault 5 GT Turbo:</b> .....	50
<b>4.2.</b>	<b>Metodología:</b> .....	50
	<b>4.2.1. Documentación bibliográfica:</b> .....	51
<b>5.</b>	<b>Resultados:</b> .....	53
	<b>5.1. Aplicaciones de la inyección de agua:</b> .....	53
	<b>5.1.1. Inyección en el orificio de admisión:</b> .....	55
	<b>5.1.2. Inyección de agua directa en el interior del cilindro:</b> .....	56
	<b>5.1.3. Inyección de agua en el orificio o conducto de gases:</b> .....	61
	<b>5.2. Inyección dependiendo del tipo de motor empleado:</b> .....	63
	<b>5.2.1. Motor de chispa o provocado:</b> .....	63
	<b>5.2.2. Motor de arranque por compactación de la mezcla:</b> .....	66
	<b>5.2.3. Agua en el conducto de admisión:</b> .....	68
	<b>5.2.4. Inyección de agua directa en la cámara de combustión:</b> .....	70
	<b>5.2.5. Inyección de agua inmediata mezclada con el combustible:</b> ..	72
	<b>5.2.6. Uso de sistema de inyección de agua incluyendo sistema de</b> <b>EGR:</b>	73
	<b>5.2.7. Inyección de agua directa en el conducto de escape:</b> .....	74
	<b>5.3. Atomización de la gota con una representación gráfica:</b> .....	78
	<b>5.4. Ventajas y desventajas que tiene el empleo de la inyección de agua:</b> 81	
	<b>5.4.1. Resultados de inyectar agua en motor de chispa:</b> .....	83
	<b>5.4.2. Campo de aplicación de la inyección de agua:</b> .....	83
	<b>5.5. Despiece de motor “C1J”: Aplicación de la inyección de agua ...</b>	87
	<b>5.5.1. Bloque de motor del “C1J”:</b> .....	87
	<b>5.5.2. Junta de culata del “C1J”:</b> .....	88
	<b>5.5.3. Camisas de cilindro del motor “C1J”:</b> .....	88

5.5.4. Pistón del “C1J”:	89
5.5.5. Anillos o aros del pistón:	90
5.5.6. Bulón del pistón en el motor “C1J”:	91
5.5.7. Biela del “C1J”:	92
5.5.8. Culata del “C1J”:	92
5.5.9. Cámara de combustión del motor “C1J”:	94
5.5.10. Cuchara de admisión/escape de motor “C1J”:	94
5.5.11. Árbol de levas de motor “C1J”:	95
5.5.12. Cáster del motor “C1J”:	96
5.5.13. Tapas externas del motor “C1J”:	97
5.5.14. Cigüeñal del motor “C1J”:	98
5.5.15. Cojinete o tapilla principal del motor “C1J”:	99
5.5.16. Cojinete de empuje o axial del motor “C1J”:	100
5.5.17. Volante de inercia o volante motor “C1J”:	100
5.5.18. Bobina de encendido de motor “C1J”:	101
5.5.19. Distribuidor o delco del motor “C1J”:	102
5.5.20. Bomba de combustible del motor “C1J”:	103
5.5.21. Carburador o inyector manual de combustible del motor “C1J”:	103
5.5.22. Sistema de lubricación o bomba de aceite de motor “C1J”:	104
5.5.23. Las bujías del motor “C1J”:	107
5.5.24. Motor de arranque del motor “C1J”:	107
5.5.25. Sistema de refrigeración del “C1J”:	108
5.6. Estudios llevados a cabo del motor “C1J” con inyección de agua y sin inyección:	112
5.7. Aplicaciones de la inyección de agua en los automóviles:	116
5.7.1. Inyección de agua implementada por la marca BMW para dar 500cv:	119

5.7.2. Motor BMW M4 GTS con climatizador propio:.....	119
5.7.3. Mayor rendimiento y menos consumo en BMW M4 GTS:.....	120
5.7.4. Elevación del caballaje y el par con la agregación del agua:	121
5.7.5. Mayor compresión en el máximo rendimiento con inyección de agua:	121
6. Conclusiones:.....	125
7. Bibliografía:.....	127

## Índice de ilustraciones:

<b>Ilustración 1:</b> Motor de avión Mustang P-51H. <b>Fuente:</b> [7] .....	23
<b>Ilustración 2:</b> Gráficas de la cantidad de gasolina/gasoil por año. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	26
<b>Ilustración 3:</b> Representación gráfica del Ciclo Diesel. <b>Fuente:</b> [8] .....	31
<b>Ilustración 4:</b> Representación gráfica del rendimiento del Ciclo Diesel. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	35
<b>Ilustración 5:</b> Valores de potencias y rendimientos de Caterpillar G3520E CHL. <b>Fuente:</b> [9] .....	36
<b>Ilustración 6:</b> Porcentaje térmico Carterpillar G3520E CHL. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo. ....	36
<b>Ilustración 7:</b> Gráfica de la mezcla estequiométrica de Caterpillar G3520E CHL. <b>Fuente:</b> [9].....	37
<b>Ilustración 8:</b> Sección de la salida de un tubo hueco de inyección. <b>Fuente:</b> [10].....	40
<b>Ilustración 9:</b> Motor de gasolina. <b>Fuente:</b> [11].....	41
<b>Ilustración 10:</b> Funcionamiento de motor de gasolina de 4T convencional. <b>Fuente:</b> [12] .....	42
<b>Ilustración 11:</b> Funcionamiento de motor de gasolina de 2T convencional. <b>Fuente:</b> [13] .....	43
<b>Ilustración 12:</b> Proceso de admisión de motor de gasolina de 4T convencional. <b>Fuente:</b> [14] .....	44
<b>Ilustración 13:</b> Proceso de compresión del motor de gasolina de 4T convencional. <b>Fuente:</b> [14].....	45
<b>Ilustración 14:</b> Proceso de ignición de mezcla del motor de gasolina de 4T. <b>Fuente:</b> [14] .....	45
<b>Ilustración 15:</b> Expulsión de gases del motor de gasolina de 4T. <b>Fuente:</b> [14].....	46
<b>Ilustración 16:</b> Motor de Renault 5 GT Turbo. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo. ....	51
<b>Ilustración 17:</b> Aumento de temperatura dependiendo del combustible. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	55

<b>Ilustración 18:</b> Partes de un motor con agregación de agua. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo. .....	56
<b>Ilustración 19:</b> Representación gráfica de la inyección en la cámara de combustión. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo. ....	57
<b>Ilustración 20:</b> Representación del uso de agua en el cilindro. <b>Fuente:</b> [15] .....	57
<b>Ilustración 21:</b> Sistema de origen y con aporte de agua. <b>Fuente:</b> [16] .....	59
<b>Ilustración 22:</b> Inyección de agua directa en el cilindro. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.	60
<b>Ilustración 23:</b> Inyección de agua en el conducto de escape. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	61
<b>Ilustración 24:</b> Inyección de agua en el conducto de escape de manera electrónica. <b>Fuente:</b> [17].....	62
<b>Ilustración 25:</b> Gráficas de la señal originada al inyectar agua en el conducto de escape. <b>Fuente:</b> [17].....	62
<b>Ilustración 26:</b> Motor de encendido por chispa con inyección de agua con control eléctrico. <b>Fuente:</b> [18].....	65
<b>Ilustración 27:</b> Potencia frente a revoluciones en función del combustible. <b>Fuente:</b> [19] .....	67
<b>Ilustración 28:</b> BSFC frente a las revoluciones en función del combustible. <b>Fuente:</b> [19] .....	67
<b>Ilustración 29:</b> Temperatura de los gases de escape frente a las revoluciones en función del combustible. <b>Fuente:</b> [19] .....	68
<b>Ilustración 30:</b> Eficiencia térmica frente a la velocidad del motor en función del combustible. <b>Fuente:</b> [19].....	68
<b>Ilustración 31:</b> Diagrama CFD de las temperaturas con el motor en funcionamiento. <b>Fuente:</b> [20].....	69
<b>Ilustración 32:</b> Intensidad de turbulencias a 2100 rpm. <b>Fuente:</b> [21].....	71
<b>Ilustración 33:</b> Intensidad de turbulencias a 5500 rpm. <b>Fuente:</b> [21].....	71
<b>Ilustración 34:</b> Mezcla de agua y aceite a un 10%. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo. ....	73
<b>Ilustración 35:</b> Temperatura generada con el sistema de EGR. <b>Fuente:</b> [22].....	74
<b>Ilustración 36:</b> Presión en el interior del cilindro con el uso de cantidades de EGR determinadas. <b>Fuente:</b> [17] .....	76



<b>Ilustración 37:</b> Cantidad de IMEP según el sistema usado. <b>Fuente:</b> [17] .....	77
<b>Ilustración 38:</b> Concentración de emisiones de NO <sub>x</sub> según el sistema usado. <b>Fuente:</b> [17] .....	77
<b>Ilustración 39:</b> Relación de compresión en función de la cantidad de agua o combustible inyectado. <b>Fuente:</b> [23].....	79
<b>Ilustración 40:</b> Representación en función del sistema de inyección de agua. <b>Fuente:</b> [24] .....	80
<b>Ilustración 41:</b> Representación real de la forma de la gota. <b>Fuente:</b> [22] .....	81
<b>Ilustración 42:</b> Árbol de levas tipo Miller. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	82
<b>Ilustración 43:</b> Sistema de inyección de agua en los reactores. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	85
<b>Ilustración 44:</b> Inyección de agua en la succión de un compresor convencional. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	86
<b>Ilustración 45:</b> Bloque de motor de “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	87
<b>Ilustración 46:</b> Junta de culata del “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	88
<b>Ilustración 47:</b> Camisa de cilindro de “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	89
<b>Ilustración 48:</b> Partes de un pistón”. <b>Fuente:</b> [25] .....	89
<b>Ilustración 49:</b> Anillos o aros del “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	91
<b>Ilustración 50:</b> Bulón de pistón del “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	91
<b>Ilustración 51:</b> Biela del motor “C1J”. <b>Fuente:</b> [26].....	92
<b>Ilustración 52:</b> Culata de “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	94
<b>Ilustración 53:</b> Cámara de combustión de “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo. ....	94
<b>Ilustración 54:</b> Válvulas del “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	95
<b>Ilustración 55:</b> Árbol de levas de “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo. ....	96
<b>Ilustración 56:</b> Cáster de “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	97
<b>Ilustración 57:</b> Válvula de desahogo de gases de “C1J”. <b>Fuente:</b> [27] .....	98
<b>Ilustración 58:</b> Cigüeñal del “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	99
<b>Ilustración 59:</b> Tapillas de biela y de bancada de “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	100

<b>Ilustración 60:</b> Tapillas axiales de “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	100
<b>Ilustración 61:</b> Volante de motor de “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	101
<b>Ilustración 62:</b> Bobina de encendido de “C1J”. <b>Fuente:</b> [28] .....	102
<b>Ilustración 63:</b> Delco del “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	102
<b>Ilustración 64:</b> Bomba de gasolina del “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	103
<b>Ilustración 65:</b> Carburador Solex del “C1J”. <b>Fuente:</b> [29].....	104
<b>Ilustración 66:</b> Bomba de aceite de “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	105
<b>Ilustración 67:</b> Bujías N3G de “C1J”. <b>Fuente:</b> [30] .....	107
<b>Ilustración 68:</b> Motor de arranque del “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	108
<b>Ilustración 69:</b> Método de refrigeración del “C1J”. <b>Fuente:</b> [31] .....	109
<b>Ilustración 70:</b> Radiador del “C1J”. <b>Fuente:</b> [32] .....	110
<b>Ilustración 71:</b> Bomba de agua del “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	110
<b>Ilustración 72:</b> Termostato del “C1J”. <b>Fuente:</b> [33].....	111
<b>Ilustración 73:</b> Renault 5 GT Turbo en “Spark load”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo....	112
<b>Ilustración 74:</b> Pruebas de inyección de agua de motor “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	113
<b>Ilustración 75:</b> Gráfica sin inyección de agua. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	114
<b>Ilustración 76:</b> Gráfica de comparación. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	114
<b>Ilustración 77:</b> Ajustes de avance de motor. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	116
<b>Ilustración 78:</b> Sistema de inyección de agua en el colector de admisión del “C1J”. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	118
<b>Ilustración 79:</b> Silueta del funcionamiento del motor BMW M4 GTS. <b>Fuente:</b> [34]..	119
<b>Ilustración 80:</b> Chasis de BMW M4 GTS. <b>Fuente:</b> [35] .....	120
<b>Ilustración 81:</b> Depósito de acumulación de agua. <b>Fuente:</b> [36].....	122
<b>Ilustración 82:</b> Motor BMW M4 GTS. <b>Fuente:</b> [35].....	123

## Índice de tablas:

<b>Tabla 1:</b> Sistema de inyección y retención de emisiones. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.	21
<b>Tabla 2:</b> Características del Renault 5 GT Turbo. <b>Fuente:</b> [5] .....	49
<b>Tabla 3:</b> Características del motor “C1J” del Renault 5 GT Turbo. <b>Fuente:</b> [5].....	50
<b>Tabla 4:</b> Características de motor. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo. ....	75
<b>Tabla 5:</b> Valores de cálculos de la gota. <b>Fuente:</b> Trabajo de campo.....	79

## **1. Introducción:**

## 1. Introducción:

Teniendo en cuenta las nuevas normativas anticontaminación y las restricciones que se han llevado a cabo en motores de gran potencia, sin la necesidad de reducir el consumo, se decide colocar un sistema de inyección por agua para conseguir dicho fin, pero también he tenido la oportunidad de ver otros motores con unos sistemas un poco rudimentarios pero que generan la misma función que el sistema diseñado por BOSCH. En este caso hablaremos de un Renault 5 GT Turbo que lleva instalados inyectores de agua en el sistema de admisión para aumentar el caballaje y reducir las emisiones. En la tabla que se muestra a continuación vemos los sistemas que se han usado para reducir dichas emisiones:

Sistemas de inyección y retención de emisiones		
Norma	Sistema de combustión por gasolina	Sistema de combustión por Diesel
EURO 1	Carburador/Carburador electrónico/Inyección electrónica monopunto/Inyección electrónica monopunto + catalizador.	Inyección en la precámara de combustión + bomba de inyección mecánica.
EURO 2	Inyección electrónica multipunto (inyección indirecta) + catalizador.	Bomba de control electrónico + acelerador electrónico + turbocompresor + catalizador de doble vía.
EURO 3	Inyección electrónica multipunto + acelerador electrónico.	Inyección en la cámara de combustión o inyección directa + bomba electrónica + turbocompresor + catalizador de doble vía + sistema de EGR.
EURO 4	Inyección electrónica multipunto + multipunto secuencial + catalizador.	Inyección directa con control electrónico (Common rail) + turbocompresor + catalizador de doble vía + sistema de EGR + MPC (Acumulación en el filtro antipartículas (FAP)).
EURO 5	Inyección electrónica directa + aproximación de catalizador al motor + sistema de EGR.	Catalizador de doble vía + filtro antipartículas + doble sistema de EGR + sistema "common Rail" + trampa de NOx (Acumulación de exceso de NOx).
EURO 6	Inyección electrónica indirecta secuencial (combinación con la directa) + sobrealimentación + catalizador lo más próximo al motor + FAP (Filtro antipartículas) + SCR (Sistema Catalítico de Reducción) con aditivo como puede ser AdBlue, urea, etc.	Sistema "common rail" + turbocompresor + catalizador de doble vía + FAP de mayor capacidad + doble sistema de EGR + SCR (Sistema catalítico de Reducción) + trampa de NOx (DENOX).

**Tabla 1:** Sistema de inyección y retención de emisiones. Fuente: Trabajo de campo.

En la tabla, se puede ver en la distribución de la misma, que a medida que han pasado los años los motores han evolucionado en lo que se refiere al sistema de inyección con un patrón que hizo que evolucionara de manera considerable. Dicho

patrón son las emisiones, en la tabla se aprecia claramente que hasta el Euro 6 no se ha implantado ningún método que aplique la inyección de agua, pero dicho sistema no se coloca en los motores por una serie de cuestiones que no eran convenientes, ya que el sistema de inyección de agua hace años solo se usaba en la competición o en motores mucho más potentes y más eficientes, como hablaremos más adelante con el sistema inventado por la marca BOSCH, donde se ha sacado hacia delante un nuevo sistema de inyección de agua. Como ellos mismos comentaron por medio de un correo electrónico, este sistema no fue obra de ingeniería de ellos, sino que viene empleándose desde la Segunda Guerra Mundial. Antes no se tenía en cuenta las emisiones tanto como en la actualidad, pero se puede decir que la inyección de agua genera una combustión mucho más eficiente y desemboca también a una menor cantidad de emisiones, como los óxidos de nitrógeno (NOx), que es uno de los que más se intenta reducir con la aplicación del sistema que se estudia en este trabajo de fin de grado. Estos gases nocivos aparecen si las temperaturas de los gases son elevadas, de tal manera que, si los gases se generan a menor temperatura, menor será el número de emisiones de NOx.

### **1.1. Antecedentes y justificación:**

Hace muchos años, el sistema de inyección de agua ha sido usado por muchos ingenieros o personas que se dedicaban a la fabricación de motores. En los antepasados aparecieron mecanismos usados por las fuerzas militares para aumentar la potencia de los motores en los aviones. Uno de estos sistemas fue la potencia de emergencia “WEP (War Emergency Power)”, sistema que era usado para nombrar las condiciones del sistema de aceleración en algunos aviones militares.

El uso de este medio para ocasiones de emergencia suministraba más del 100% de la potencia generada por el motor en un tiempo limitado, durante al menos 5 minutos. Uno de los aviones que usaban este sistema fue el modelo americano P-51H Mustang que daba 1.380hp y con el sistema de emergencia WEP proporcionaba 2.218hp. Aun así, había modelos que sin estar equipados de origen con sistema WEP, su potencia se incrementaba en un 17%.

Los motores de los aviones en sus primeras generaciones solo tenían como función extra que el acelerador se abriera más de lo normal, permitiendo de tal manera que entre al cilindro una mayor cantidad de aire. Por lo contrario, todos los métodos utilizados con WEP lograban una mayor potencia y también reducían demasiado la vida

de trabajo del motor. Un ejemplo es el motor del P-51, el empleo del WEP requería que el avión fuera inspeccionado antes de llevar a cabo el siguiente vuelo.



**Ilustración 1:** Motor de avión Mustang P-51H. Fuente: [7]

En aquella época había muchos inventos como son los sistemas alemanes compuestos por óxidos de nitrógeno, y la inyección de agua y metanol.

Hay un sistema muy innovador que es el sistema MW-50, que fue empleado por uno de los componentes más usados por las campañas militares que es:

- 50% agua
- 50% metanol

Es por lo que los alemanes le ponen el nombre de “wasser” o “agua” en español, cuya función era rociar dentro del supercargador de los aviones principales dado que el principal efecto es que no detona, lo que genera una presión mucho mayor generada en el interior del cilindro, aunque el principal efecto secundario es producir enfriamiento en el interior del motor.

En cambio, por otro lado, los efectos producidos por MW-50 son muy dramáticos, ya que con un solo click en el interruptor de encendido del sistema nos permitía al motor absorber más cantidad de aire debido al efecto que produce el refrigerante. Ello incrementa muchísimo el rendimiento alrededor de 100 hp para otras marcas; de hecho, el MW-50 permitía al sistema del supercargador producir una mayor velocidad y presión, generando un aumento combinado de 500hp. Podemos ver que el motor funcionaba a nivel del mar, esto hacía que un motor de 1600hp funcionara entorno a los 2000hp.

El motor MW-50 era totalmente funcional hasta una altura de 6000 metros. Sobre esta altura, solo generaba un aumento de rendimiento del 4% y todo debido al enfriamiento que se generaba en el interior del motor. Este sistema no fue el único sistema usado por los alemanes, también se usó en algunos casos para estas grandes altitudes un intercooler, dado que se necesitaba un enfriamiento para periodos muchos más prolongados.

Teniendo en cuenta el ámbito de producción de motores de combustión interna alternativos se pueden emplear:

- ⇒ **Producción de energía eléctrica:** “motores que con el movimiento que producen accionan generadores eléctricos desde potencias inferiores a 1Kw hasta llegar a potencias elevadas de 80Mw.”
- ⇒ **Para la propulsión de vehículos como:** coches, vehículos agrarios, vehículos para obras públicas, embarcaciones, ferrocarriles, sistemas aéreos.
- ⇒ **Muchos otros sistemas como son:** motobombas, motosierras, sulfatadoras y muchas otras herramientas que se componen de un motor de combustión.

Después de los años 50 del siglo pasado comienzan en Estados Unidos las preocupaciones por las emisiones de gases. En cuanto a lo referido al ámbito marítimo hay que tener en cuenta la contaminación de los mares debido al hundimiento de los mismos que pueden tener en el interior de sus tanques sustancias peligrosas, es por lo que en la actualidad los buques deben pasar una gran cantidad de inspecciones a un número determinado de uso. Debido a esto, es Estados Unidos el primer país en implantar las normativas para regular las emisiones, precisamente en California. Es más adelante cuando estas normativas son extendidas a todas las partes de Estados Unidos y muchos otros lugares del mundo como es Japón y unos años después en Europa. Debido a la crisis originada por el petróleo en el año 1973 y 1979 y la gran preocupación que había con respecto al agotamiento del mismo, la contaminación atmosférica influye de manera considerable en la innovación de los motores, no teniendo solamente en cuenta el campo de automoción sino en muchos otros campos, por el desarrollo de una mejoría en todas las prestaciones no en cuanto a la potencia como había pasado hasta no hace mucho tiempo sino también en el consumo, y las emisiones no solo de los gases sino el sonido en las ciudades.

En lo que se refiere a la normativa encargada de dichos parámetros ha colocado un numero considerado de restricciones y se ha vuelto un gran reto para la industria de

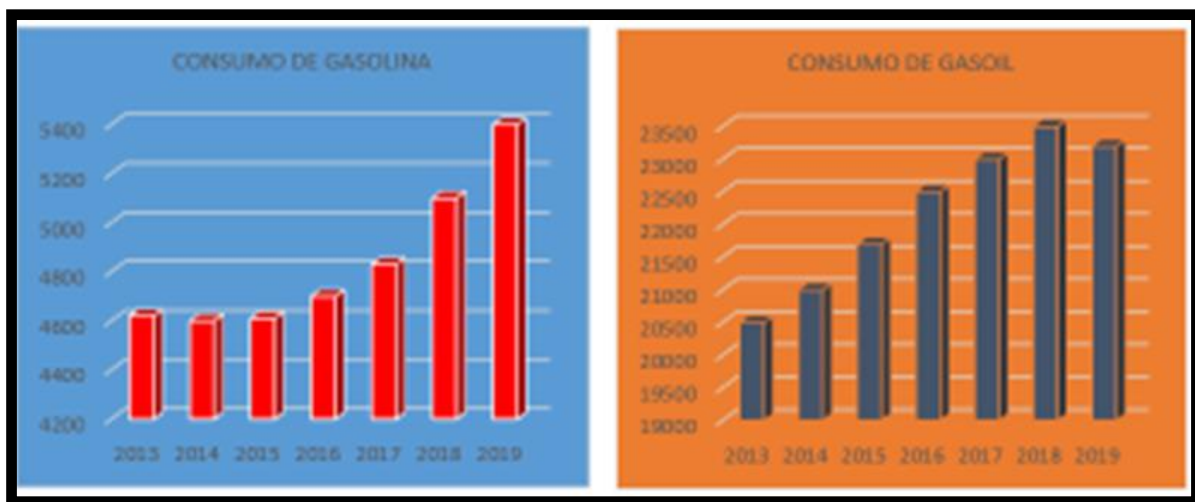


la generación de motores, dado que si tenemos en cuenta la reducción de los valores o determinados parámetros como puede llegar a ser el consumo, la cantidad de emisiones y el incremento de la potencia específica son los objetivos más difíciles para llevar a cabo. Desde hace un par de años atrás se ha extendido el uso del Motor Diesel en gran medida, y es debido al principio de funcionamiento de dicho Motor Diesel, que dependen de determinados factores:

- ⇒ Sistema de Inyección.
- ⇒ Proceso de combustión.
- ⇒ Sistema de formación de la mezcla.

## **1.2. Modelado según la historia:**

En el inicio de la revolución industrial, ha crecido de manera considerable el consumo energético. Es en el año 1980 cuando el consumo de estos combustibles alcanza un gran valor usandolo en hogares e industrias, pero fue en 1900, cuando el consumo energético de todo el mundo llegó a 0.7 Tw. En las pruebas más recientes llevadas a cabo en el año 2019, es cuando por primera vez se lleva a cabo un cambio debido a la gran adicción que hay por el empleo de la gasolina haciendo que el Diesel fuera decayendo. Si vamos a datos reales vemos como: en el año 2019, España consumió 23.4 millones de toneladas de gasoil para automoción y unos 5,4 millones de toneladas de gasolina. El valor del consumo de gasoil es mucho mayor dado que en la actualidad la circulación de coches con combustible Diesel es mayor. En cambio, si comparamos estos datos con el año 2018, nos encontramos con una reducción bastante considerable del combustible Diesel de 0.4% pero lo contrario con la gasolina aumentando en un 5.4%, más claro lo podemos ver en las siguientes gráficas de gasolina y Diesel donde se ve el consumo con respecto a cada año, sacando un balance desde 2013 hasta 2019:

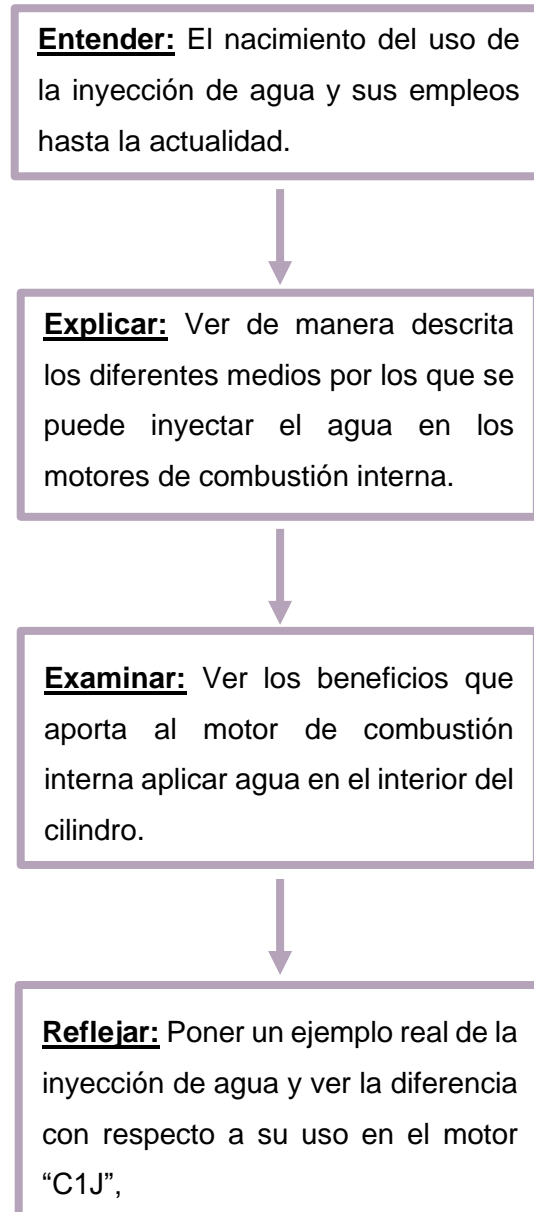


**Ilustración 2:** Gráficas de la cantidad de gasolina/gasoil por año. **Fuente:** Trabajo de campo.

## **2. Objetivos:**

## 2. Objetivos:

En el transcurso de este Trabajo de Fin de Grado se ha propuesto explicar de manera importante la historia de la cual nació el uso de la inyección de agua, dado que esto no fue inventado hace muy poco sino desde muchos años. Por lo tanto, se plasmará mediante un esquema cuáles son los objetivos a los que queremos llegar en la explicación de “**Sistema de inyección de agua en motores de combustión interna**”. Esto lo vemos claramente a continuación:



### **3. Revisión y antecedentes:**

### **3. Revisión y antecedentes:**

Aquí veremos los diferentes medios por los cuáles se puede llevar a cabo la agregación de agua en el interior del cilindro. En el estudio que hemos realizado en motor "C1J" se realiza en el colector de admisión, pero veremos más medios por los que se puede agregar el agua:

#### **3.1. Motores de combustión interna convencionales:**

Comenzando por saber qué es un motor Diesel, éste se trata de un motor de combustión interna alternativo cuyo encendido se lleva a cabo gracias al proceso llevado a cabo durante la compresión. El inicio del encendido de la mezcla aire/combustible se lleva a cabo por el autoencendido que una vez se inyecta de forma directa en el interior de la cámara y finalizado el proceso de compresión, dicha mezcla se evapora y la combustión que se lleva a cabo es mucho más eficiente, sobrepasando el rendimiento superior al 50%; en cambio, si tratamos el caso de los motores Diesel lentos marinos pues son mucho más eficientes y se obtiene un mayor rendimiento. El consumo de combustible da como beneficio una reducción de la contaminación, es por lo que en la revolución del uso del Motor Diesel todo el mundo los empleaba por su bajo consumo de combustible. El diseño de los Motores Diesel puede ser tanto desarrollando un ciclo de 2T o 4T. Las principales aplicaciones de estos motores de 2T en el campo naval como se dijo con anterioridad y en el sistema ferroviario y, sobre todo, en las centrales para la generación de energía eléctrica. A continuación, trataremos un proceso muy importante con respecto a la producción de emisiones:

⇒ **Proceso de combustión de motor de combustión interna:** Durante el proceso de combustión en los motores de combustión interna hay un factor muy influyente que incide de manera directa como es el rendimiento, la cantidad de emisiones y la cantidad de ruido, que inciden en la generación de la mezcla de aire/combustible. Los factores que más influyen en la calidad de la mezcla de aire/combustible:

- Inicio del sistema de inyección.
- Generación de curva de la inyección y duración de la misma.
- Presión en el momento de la inyección.
- Número de veces que se inyecta.

En lo que se refiere a los motores de combustión que emplean como combustible el Diesel y en lo que se refiere al ruido y los gases generados

durante el proceso de la combustión, tanto el ruido como los gases se pueden reducir empleando técnicas que controlen el proceso de la combustión.

### **3.1.1. Ciclo diésel de 4T o motor de cuatro carreras:**

Si tenemos en cuenta el ciclo de trabajo de los motores Diesel sabemos que dicho trabajo se genera con dos movimientos del propio cigüeñal y los procesos por los que está formado que nombraremos más adelante son:

- Proceso de admisión.
- Proceso de compresión.
- Proceso de combustión o explosión.
- Proceso de escape.

A continuación, en la gráfica siguiente se puede ver claramente una gráfica muy vista durante tercero de carrera en la asignatura de motores y vemos cómo se lleva a cabo el ciclo de funcionamiento de un Motor Diesel:

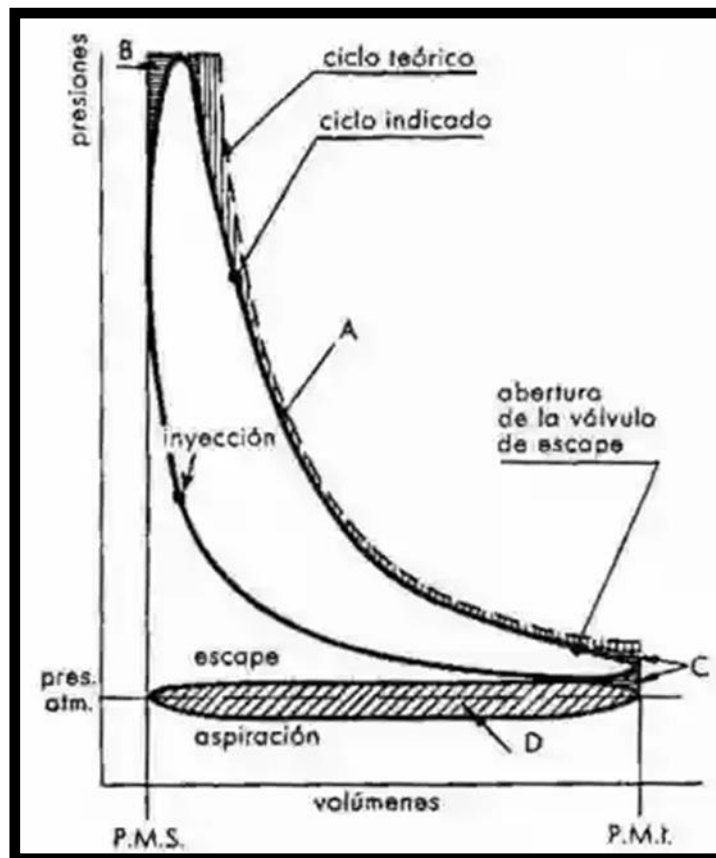


Ilustración 3: Representación gráfica del Ciclo Diesel. Fuente: [8]

- ⇒ **Carrera de admisión o aspiración:** Durante el proceso de admisión se lleva a cabo la apertura de la válvula de admisión, momento en el que el pistón se encuentra en el punto muerto superior (PMS). El pistón se mueve hasta llegar a la parte baja o punto muerto inferior (PMI), de esta manera produce aspiración al bajar el cilindro y entra aire en la cámara del cilindro.
- ⇒ **(1-2) Carrera de compresión (P=cte):** La carrera de compresión es uno de los procesos ideales y además es un proceso isentrópico (entropía constante). Es el momento en el que ha finalizado el proceso de aspiración y se cierra la válvula de admisión, el cigüeñal gira y el pistón sube de nuevo hacia el punto muerto superior (PMS) y de esta forma la mezcla de aire/combustible se comprime y aumenta tanto la temperatura en su interior como la presión.
- ⇒ **(2-3) Carrera de calentamiento:** Es en el proceso 2-3 donde ambas válvulas tanto la de admisión como la de escape se encuentran totalmente cerradas y la posición exacta del pistón es en el punto muerto superior (PMS). Es el momento en el que el proceso de combustión donde se pulveriza el combustible por medio del inyector y la mezcla es producida por medio de aire caliente que ha sido generado su encendido con múltiples explosiones las cuáles generan el encendido de gran parte del combustible. Es el momento en el que la presión permanece constante y hay un aumento del volumen dado que hay "aire + combustible".
- ⇒ **(3-4) Carrera de expansión o trabajo (momento isentrópico):** Cuando la mezcla de aire/combustible se inflama hay un cambio de energía debido a la inflamación del combustible y es cuando se producen los respectivos gases generados durante la combustión y debido a la explosión de dicha mezcla, hace que el pistón descienda hasta el punto muerto inferior (PMI) y de esta forma se completa un giro.
- ⇒ **(4-1) Carrera de expulsión de los gases de la combustión (V=cte):** Proceso en el cual es constante el volumen. En este punto existe una transferencia de energía calorífica que es transmitido de forma inmediata a diferentes lugares del motor, pero especialmente a las paredes del cilindro.
- ⇒ **Carrera de escape:** Es en el proceso de escape cuando los gases que se han producido en la combustión quieren salir al exterior, por lo que se abre la válvula de escape para canalizar dichos gases hasta el exterior,



cediéndose de esta forma una gran cantidad de calor a la atmósfera. El pistón vuelve a su recorrido de tal manera que asciende hasta llegar al punto muerto superior (PMS).

### **3.1.1.1. Proceso de combustión Diesel:**

Si tenemos en cuenta el proceso de la combustión en los motores diésel es principalmente el momento en el que se intenta inyectar el combustible en la cámara y, dicho combustible que hemos incorporado en la cámara en estado líquido pasa de inmediato a estado gaseoso. Debido al efecto generado por los inyectores el combustible es atomizado, generándose en la cámara la mezcla de aire/combustible. Debido al fenómeno generado en el proceso de la combustión, ésta solo se produce en puntos localizados.

Si se tienen en cuenta un número determinado de factores, se ve claramente que la mezcla de aire/combustible y el proceso de la combustión son ambos unos procesos que son producidos de forma inmediata. El combustible se inserta de forma directa y se genera una mezcla nueva con el propio aire y, de esta forma, se produce el proceso de quemado.

El funcionamiento del motor está condicionado por determinadas características de la inyección dado que el tiempo del combustible para la realización de la mezcla es mínimo. El proceso de admisión es muy limitado donde se tiene en cuenta la cantidad de componentes que se colocan en la mezcla como es el funcionamiento del mismo, no solo teniéndolo en cuenta en los motores Diesel sino también en los de gasolina, los elementos que los componen son muy parecidos, lo que nos quiere decir, que ambos sistemas cuentan con los mismos componentes como son:

- Depósito de combustible.
- Conductos de combustible.
- Bomba de combustible.
- Filtro de combustible.
- Bomba de inyección.
- Tuberías de comunicación de alta presión.
- Sensores, etc.

El método empleado para el funcionamiento de ambos motores tanto para el Diesel como para el de gasolina son muy semejantes para ambos.

En primer lugar, la bomba de combustible puede ser de paletas o engranajes, y se encarga de transportar el combustible desde el lugar de almacenamiento como es el tanque de combustible hasta el punto donde se eleva la presión o también llamado bomba de alta presión, suministrando de esta forma el combustible a una presión lo más constante posible como puede ser el valor de 0.75 bares. Este combustible se hace pasar antes por un filtro donde se eliminan todo tipo de burbujas de aire o restos de partículas que pueden afectar al funcionamiento normal tanto del emisor como del receptor, teniendo en cuenta en este caso que el emisor es la bomba de inyección y el receptor que es el inyector. En lo que se refiere al mantenimiento del sistema de inyección como es la sustitución de los filtros hay que tener muy en cuenta estos temas, dado que si el sistema de inyección absorbe basura puede llegar a tener un mal funcionamiento. En cuanto al suministro, que es lo importante la bomba de inyección, debe aportar de manera constante combustible que se necesita, contando con un sistema de regulación de presión y es este combustible inyectado en forma de dispersión y se mezcla haciendo la mezcla de aire/combustible en el interior de la cámara. La leva del eje de camones es la encargada de suministrar el movimiento a la bomba debido al giro del propio motor, lo que se quiere es que la combustión se lleve a cabo de manera lo más favorable posible, es por lo que este proceso debe estar muy bien calibrado, de esta forma el arranque se puede adelantar o atrasar según el punto de funcionamiento que se quiera lograr en dicho motor. En la actualidad, las bombas de inyección tienen unos sistemas que corrigen la sobrepresión y estos sistemas son regulados de manera electrónica, como son sensores de alta presión en el rail de inyección, etc. En años anteriores, las bombas de inyección generaban presiones de alrededor 1000 bares, en cambio, las bombas de inyección de última generación producen 1500 y 2000 bares de presión. Para la producción de éstas elevadas presiones las bombas deben fabricarse con unos elementos muy robustos y con ello acarrea fabricar robustos conductos de combustible. La fabricación de estos conductos normalmente se hace de manera lineal sin uniones ni soldaduras para no variar el diámetro del mismo. En cuanto al número de tubos hay que tener en cuenta que es el mismo número que de cilindros que contenga el motor, en el caso de que los tubos no tengan el mismo diámetro pues se producirían efectos dinámicos y, otro factor a tener en cuenta es que tengan la misma longitud, así hay igualdad de sobrepresiones en todos los inyectores.

En segundo lugar, los elementos finales de la cadena del sistema de inyección son los inyectores, cuya finalidad es pulverizar el combustible en el interior de la cámara de combustión. Un inyector está compuesto básicamente de una punta con numerosos

orificios por los cuales pasa el combustible y de tal manera se pulveriza. La presión generada por la bomba de inyección hace que el agua del interior del inyector se levante. Antiguamente se llevaba a cabo de manera manual por un resorte calibrado y en la actualidad el accionamiento de la aguja del inyector se realiza de forma eléctrica. El pulverizado del combustible es cortado debido a la evaporación del combustible junto con el aire.

### 3.1.1.2. Rendimientos del Ciclo Diesel:

Si tenemos en cuenta los rendimientos generados por un motor Diesel vemos como el punto de trabajo es un proceso adiabático donde se combina el proceso de compresión y el de descarga. Los métodos empleados para determinar dichos rendimientos se pueden realizar por medio de procesos a presión y volumen constante. Si observamos cómo se lleva a cabo el cálculo de la energía de entrada, salida y la respectiva eficiencia, éstas se calculan por medio de las temperaturas y el calor específico. Esto lo podemos ver en la ilustración 5:

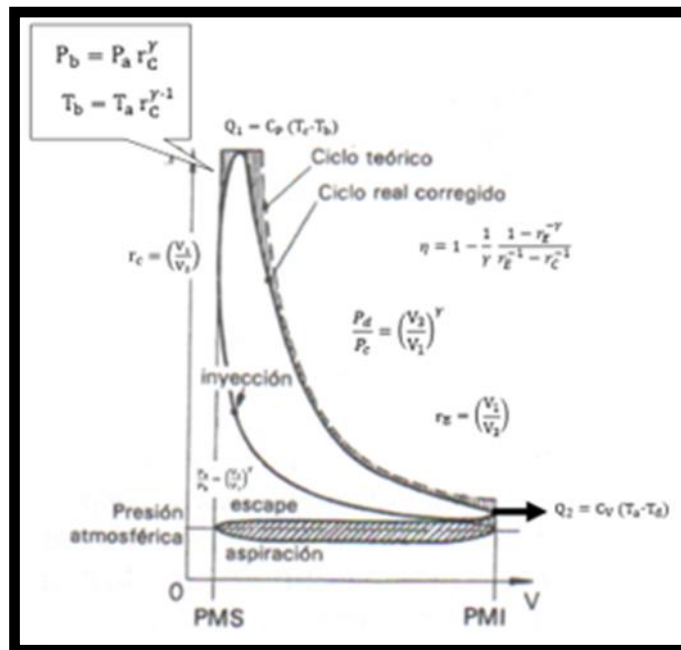


Ilustración 4: Representación gráfica del rendimiento del Ciclo Diesel. Fuente: Trabajo de campo.

En la siguiente tabla vemos por medio del manual del motor la eficiencia del generador Caterpillar G3520E CHL:

POTENCIAS Y RENDIMIENTOS			100%	75%	50%
POTENCIA AL FRENO	(1)	bkW	2070	1553	1035
POTENCIA ELÉCTRICA ( $\cos\phi=1$ )	(2)	ekW	2018	1513	1003
<b>RENDIMIENTO DEL MOTOR (ISO 3046/1)</b>	<b>(3)</b>	<b>%</b>	<b>43,5</b>	<b>42,3</b>	<b>39,8</b>
<b>RENDIMIENTO ELECTRICO (ISO 3046/1)</b>		<b>%</b>	<b>42,4</b>	<b>41,2</b>	<b>38,6</b>
RENDIMIENTO DEL MOTOR (NOMINAL)	(3)	%	42,5	41,2	38,8
RENDIMIENTO TERMICO	(4)	%	43,9	45,0	47,4
RENDIMIENTO TOTAL	(5)	%	86,3	86,2	86,2

Ilustración 5: Valores de potencias y rendimientos de Caterpillar G3520E CHL. Fuente: [9]

### 3.1.1.3. Porcentaje térmico o de calor:

Un valor muy importante a tener en cuenta en los motores actualmente es el balance térmico, el cual se denomina de esta forma porque es la suma del trabajo y las pérdidas, “salidas que producen trabajo”, que es igual al trabajo desarrollado por la energía suministrada o de entrada. En cuanto a la energía térmica que se produce por el combustible solo se aprovecha una pequeña parte para generar trabajo útil, en cambio resto se consumirá.

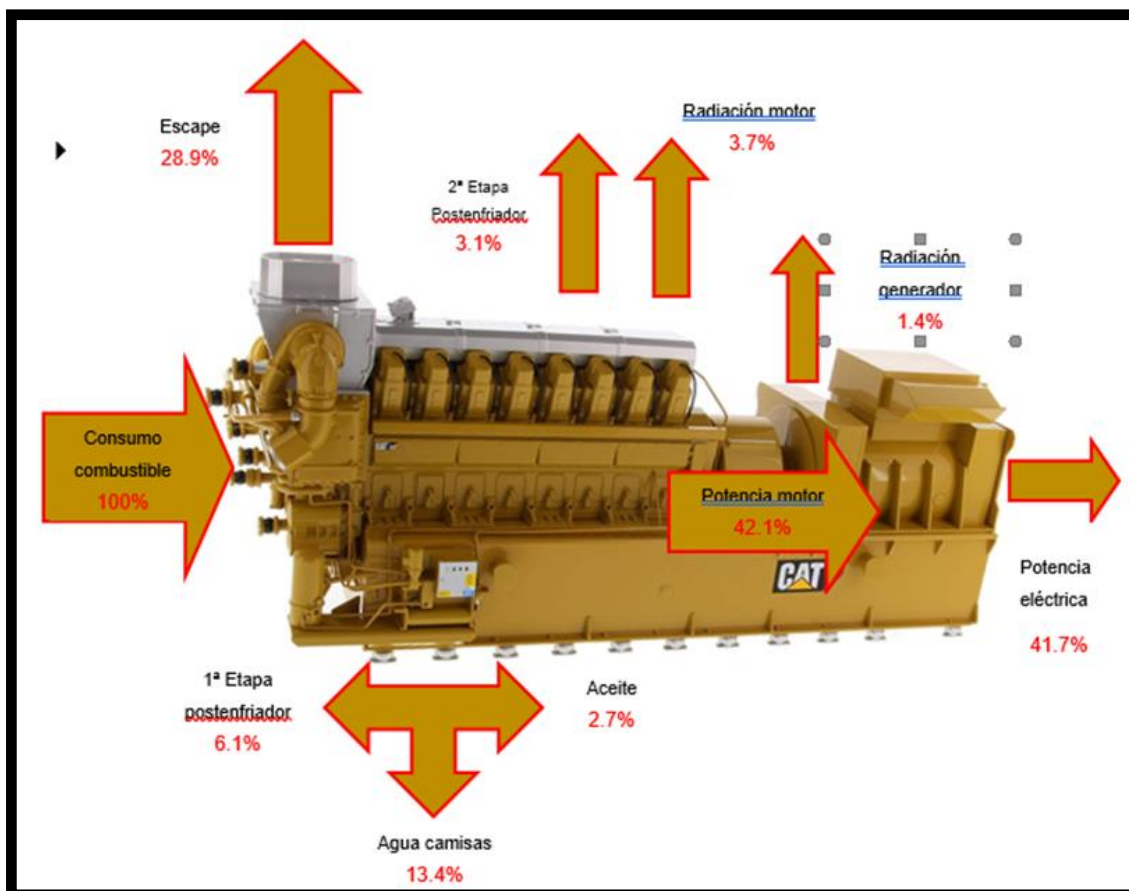


Ilustración 6: Porcentaje térmico Carterpillar G3520E CHL. Fuente: Trabajo de campo.

### 3.1.1.4. Proceso de combustión de la mezcla:

Durante el proceso de combustión de la mezcla aire/combustible no se busca que sea perfectamente estequiométrica, sino que el aire y el combustible sea en proporciones y estos valores deben ser mucho menores a los trabajados con la unidad. Creo que, si tenemos en cuenta algo muy común y que es sencillo, es que una mezcla pobre significa que la cantidad de aire de la mezcla es mucho mayor que la de combustible. Esto lo podemos ver con claridad en la gráfica de operación del proceso de combustión del Carterpillar G3520E CHL:

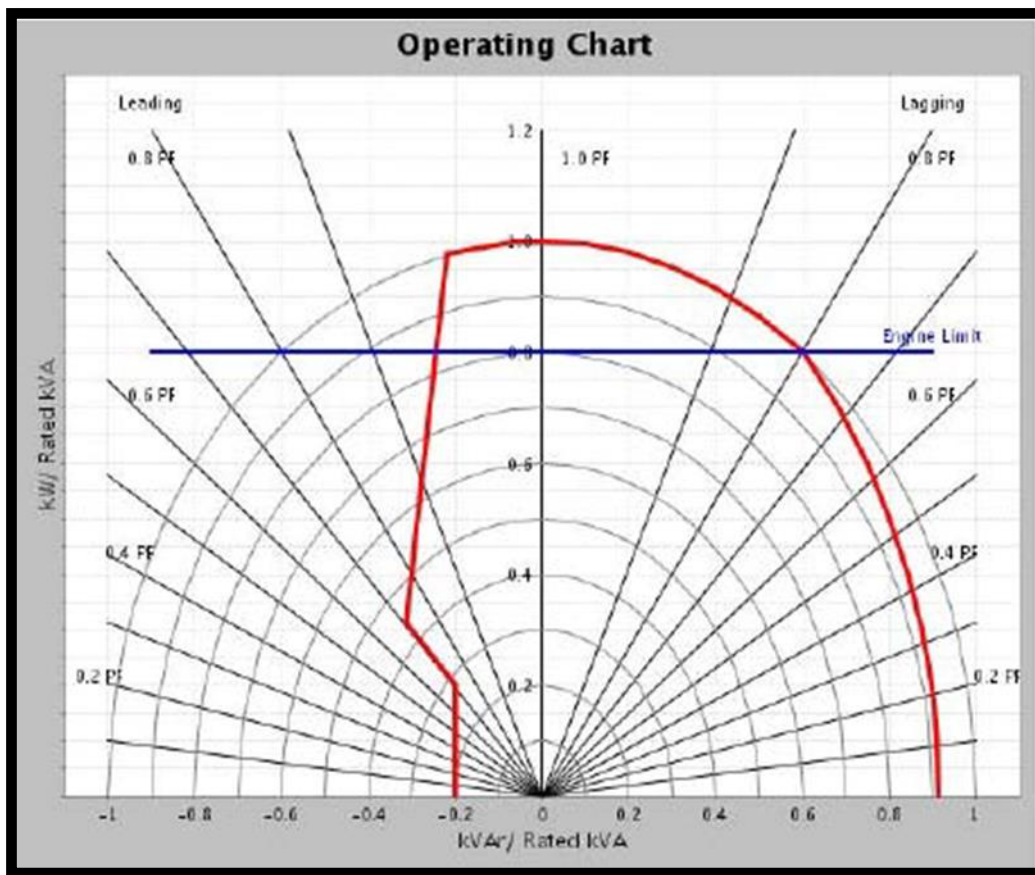


Ilustración 7: Gráfica de la mezcla estequiométrica de Caterpillar G3520E CHL. Fuente: [9]

### 3.1.1.5. Flujo de cantidad de movimiento durante el chorro de combustible:

Si atendemos a un valor tan importante como es el flujo, no en sí el propio flujo sino el flujo de la cantidad de movimiento, el fundamento principal es tener en cuenta el golpe producido por el combustible que se chorrea en el interior de la cámara. Un elemento muy importante en un Motor Diesel para que funcione correctamente es el sistema de inyección que depende de la mezcla generada por aire/combustible, de este

factor depende el respectivo rendimiento del motor " $\eta$ " y las emisiones generadas por el mismo, aún más teniendo en cuenta las exigencias que se tienen en hoy en día como se dijo con anterioridad. Más adelante veremos por qué se está tratando el sistema de inyección que hay con la creación de un nuevo motor de la marca BMW, que no solo produce mayor caballaje, sino que además reduce la cantidad de emisiones.

Teniendo en cuenta los fenómenos involucrados en el proceso de inyección para llevar a cabo mejoras de las prestaciones, hay que tener en cuenta el diámetro de salida del conducto de los gases de escape, dicho conducto influye en el pulverizado de la inyección.

Mayoritariamente lo más que influye en el sistema de inyección, como se explicó con anterioridad, es tanto el conducto de admisión como el de escape. El estudio por el cual se fabrican estos conductos en la actualidad es muy poco conocido, dicho desconocimiento se justifica por la enorme dificultad que se presenta al estudiar su flujo en el interior del conducto. Esto se debe a los siguientes factores:

- ⇒ Teniendo en cuenta las reducciones de las dimensiones de los conductos, dichas características tienden a ser de 1mm, aunque el diámetro del mismo suele estar medido en décimas de mm.
- ⇒ Otro de los factores que se deben tener en cuenta es la velocidad de la cantidad de flujo, sobre todo debido a los gradientes de la presión a la que trabajan las toberas, cuya finalidad es que en el atomizado se generen fenómenos favorables.
- ⇒ Lo que se intenta crear con la pulverización del combustible es hacer que no se generen chorreos y que se produzca de manera adecuada la mezcla aire/combustible. La velocidad de generación del flujo en su interior puede generar altas velocidades (m/s).
- ⇒ La creación de un flujo transitorio, cuyas duraciones de inyección como máximo pueden ser del orden de milisegundos, donde la cantidad de flujo influye en la forma de la aguja del propio inyector, sobre todo cuando se lleva a cabo la apertura y el cierre del mismo, dado que la temperatura y la presión con la que se trabaja puede variar considerablemente.
- ⇒ Estudio detallado del flujo en la parte interna de los inyectores, en este caso en las toberas, dado que es algo demasiado complejo.

La principal finalidad es mejorar el proceso de compresión sobre el proceso de inyección. Hay que hacer bastante hincapié en la física que se refiere en lo relacionado al flujo en la parte interna y cómo influye en el pulverizado del propio combustible; para

ello se ve un nuevo sistema de manera experimental en el cual se lleva a cabo una medición del flujo con la cantidad de movimiento “fcdm” durante el pulverizado. Algunos de los parámetros a tener en cuenta en el estudio experimental de la inyección son:

- ⇒ Estudio del flujo en el interior de la tobera. La variable de flujo nos da una gran cantidad de información en comparación con la que aporta el flujo másico, dado que si utilizamos estos valores como es el caso del flujo másico y la cantidad de movimiento nos da la velocidad de salida y la medida del paso.
- ⇒ Estudiando la cantidad de combustible inyectado, los parámetros a tener en cuenta son los siguientes:
  - Cantidad de combustible inyectado.
  - Ángulo de incidencia o la cantidad de aire que se engloba.

Los valores tanto de la cantidad de combustible inyectado, el ángulo de incidencia y la cantidad de aire englobado en su interior dependen del flujo de la cantidad de movimiento (fcdm).

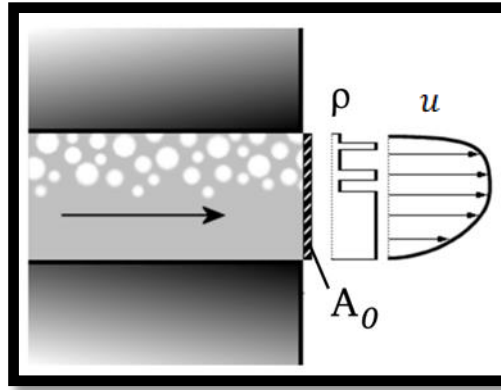
### **3.1.1.6. Chorreado de inyección por medio del flujo de la cantidad de movimiento:**

El chorreado de la inyección tiene mucho que ver con el flujo de la cantidad de movimiento. Su valor es cero si se tiene en cuenta el momento lineal del mismo, tal cálculo se lleva a cabo como el producto de la respectiva masa y la velocidad del este, pero también el flujo es una magnitud vectorial. Si se traslada el valor obtenido al fluido, como es el caso del combustible por medio de un conducto o sección, se consigue el valor del flujo. Por ello, el flujo se calcula como el producto del flujo másico y la respectiva velocidad, y se lleva a cabo por medio de una superficie de control determinada por medio de la siguiente ecuación:

$$M = \int_{SC} \rho V (V * n) dA$$

Si se aplica la fórmula de la respectiva sección en la salida de un conducto hueco podemos ver en la siguiente imagen representativa de lo que queremos explicar:





**Ilustración 8:** Sección de la salida de un tubo hueco de inyección. Fuente: [10]

Solamente el elemento axial se coloca de manera perpendicular a la superficie que se desea controlar, de tal manera que se obtiene la siguiente ecuación:

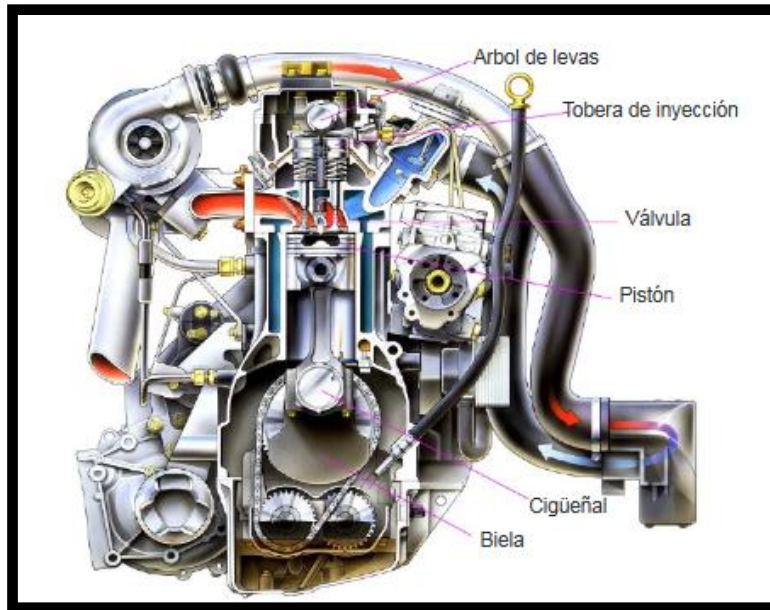
$$M = \int_{A_0} \rho u^2 dA$$

El valor del perímetro se obtiene mediante el flujo que se encuentra en la salida del pulverizado de inyección generado durante la inyección.

### **3.1.2. ¿Cómo funciona un motor de gasolina?:**

En el caso del funcionamiento de los motores de gasolina, éstos fueron inventados por August Otto en el año 1876, denominándose con su nombre como Otto. La utilidad de estos motores en su pleno apogeo fue muy amplia: como es el caso de las motos, coches, aviones, barcos, etc. La partida creación del motor Diesel se originó gracias al uso del motor de gasolina, pero la gran diferencia de los motores de gasolina con respecto a los motores Diesel es el proceso de la combustión, ya que el momento de la mezcla aire/combustible cuyo encendido es provocado por la chispa que produce la chispa generada por la bujía y las prestaciones que genera son mucho más positivas que un motor Diesel. Vemos una imagen de un motor de gasolina con sus respectivas partes:





**Ilustración 9:** Motor de gasolina. Fuente: [11]

En el caso de tener en cuenta los motores de gasolina o explosión, se está hablando de un motor como cualquier otro, dado que el combustible se inflama y explosiona, dicha cámara o espacio es creado por la camisa del cilindro y la tapa o culata. En su época los motores de gasolina tuvieron un gran auge, como ya se dijo, en los transportes, ya que permitieron la creación de un automóvil real y el avión. Para ello, explicaremos detenidamente el funcionamiento de este motor.

El proceso de funcionamiento del motor de gasolina como el del motor Diesel son muy parecidos, exceptuando el momento de encendido de la mezcla ya que el caso del motor Diesel, debido al aire de entrada a alta presión y su respectiva temperatura, el combustible se autoinflama, en cambio en el motor de gasolina la chispa es la encargada de generar la explosión de la mezcla aire/combustible.

### **3.1.2.1. Motor de gasolina de 4T convencional:**

El funcionamiento de un motor de 4T convencional está fundamentado en función de la cantidad que se quiera inyectar en la mezcla aire/combustible. El proceso comienza con la absorción del aire de la atmósfera y se junta con el combustible. Si ya se encuentra dicha mezcla en el interior de la cámara de combustión, el valor alcanzado por la mezcla es de 8:1. El punto en el que se inflama la mezcla suele ser mucho antes de que el pistón alcance su punto muerto superior "PMS", de tal manera que la mezcla es inflamada mediante una chispa generada por una bobina y un rotor que se transmite a la bujía que se encuentra atornillada a la parte alta de la cámara para generar dentro

del cilindro el triángulo del fuego, dado que tenemos en el interior combustible-comburente o aire-energía de activación que es la chispa. En este proceso de combustión es cuando se produce una gran presión, momento en el cual el pistón es empujado hasta el punto muerto inferior "PMI". En este punto es donde el motor genera trabajo útil, recibiendo este momento como "Tiempo de trabajo". Durante la bajada del pistón en el proceso de escape, los gases generados durante la combustión son expulsados por el respectivo conducto de la válvula de escape en dirección al exterior por medio del escape y es cuando se inicia el nuevo ciclo del motor.

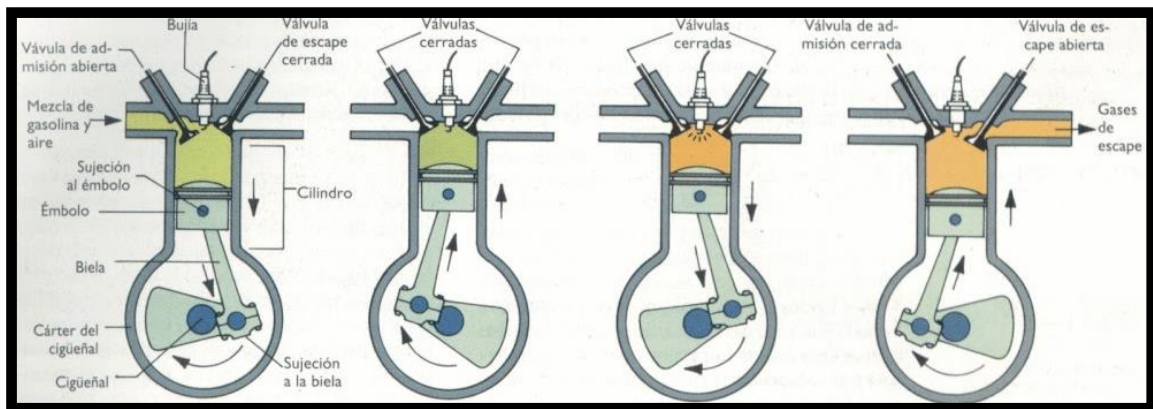
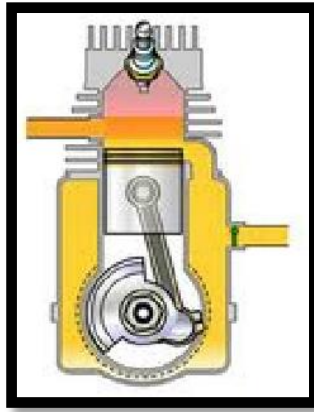


Ilustración 10: Funcionamiento de motor de gasolina de 4T convencional. Fuente: [12]

### 3.1.2.2. Motor de gasolina de 2T convencional:

Los motores de gasolina de 2T son idénticos a los motores de 4T, la gran diferencia entre éstos es que el motor de 2T no dispone de un sistema de válvulas sino de lumbreras. En el interior del cilindro se practican unos conductos para que se lleve a cabo el proceso de aspirado o admisión y otro conducto para llevar a cabo el proceso de la expulsión de los respectivos gases de escape. Tanto en el proceso de admisión y combustión se unen y de la misma manera ocurre en los momentos en los que se comprime la mezcla y se expulsan al exterior los gases, cada giro producido en el motor el motor genera trabajo. En el caso del motor de 2T se dispone de grandes ventajas y es que puede dejar de necesitar de todo el sistema de distribución por medio de las válvulas, lo que hace que el motor sea muchísimo más compacto y además sea muy usado para motos, cortacésped, motosierras, aviones de aeromodelismo, coches RC, etc.



**Ilustración 11:** *Funcionamiento de motor de gasolina de 2T convencional.* Fuente: [13]

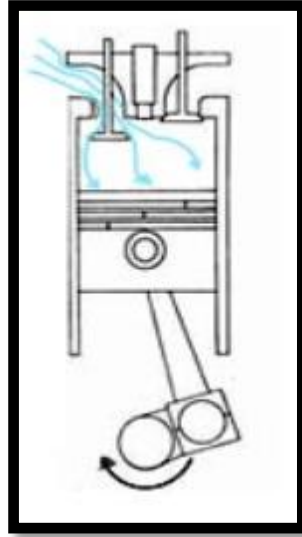
Actualmente gran parte de los motores de 2T no usan como sistema de dispensación de combustible el carburador. Dicha combustión, que es una mezcla de aire/combustible, se produce por medio de un medio que racionaliza el combustible de manera perfecta como es el caso del sistema de inyección electrónico. Este método es aún más efectivo y reduce de manera considerada el consumo de combustible, aunque se puede decir que hay otros medios como puede ser la inyección directa de combustible que suele ser uno de los métodos más eficientes por el cual esta cantidad de gasolina se inserta por medio de un inyector en el interior del cilindro a través de una tobera de uso para inyectar la gasolina, produciendo un aumento muy considerable del rendimiento del proceso de combustión.

Más adelante se explicará de forma detallada las diferentes fases de funcionamiento de los motores de gasolina de 4T, dado que es uno de los elementos que más vamos a tratar como estudio para la inyección de agua en el respectivo motor del vehículo en el que se va a llevar a cabo, pues que los motores de 2T, aparte de llevar a cabo su fabricación para determinados vehículos como es para motor de baja cilindrada, no es tan utilizado como el motor de 4T. Ahora se mostrarán los diferentes procesos del motor de gasolina de 4T convencional:

### **3.1.2.2.1. Proceso de admisión de motor de gasolina de 4T convencional:**

Durante el proceso de admisión estamos ante uno de los primeros procesos en llevarse a cabo en lo que se refiere al ciclo de 4T, es el momento en el que el pistón realiza la función de bajada hacia el punto muerto inferior "PMI", de tal manera que la válvula de admisión es empujada de manera descendente y dicho movimiento es llevado a cabo por la respectiva leva del eje de camones donde se inicia el proceso de apertura,

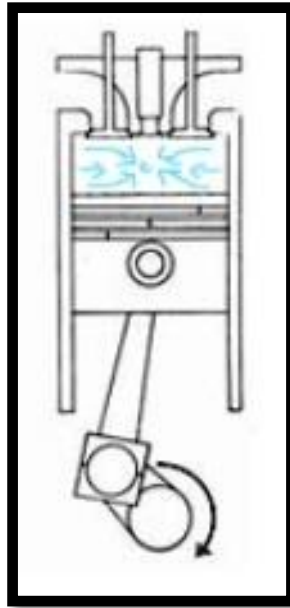
entrando rápidamente el combustible en el interior de la cámara. Es en el momento de la admisión cuando las válvulas de escape se encontrarán en el periodo de cerrado como vemos ilustrado en la siguiente imagen:



**Ilustración 12:** *Proceso de admisión de motor de gasolina de 4T convencional.* Fuente: [14]

### **3.1.2.2.2. Proceso de compresión del motor de gasolina de 4T convencional:**

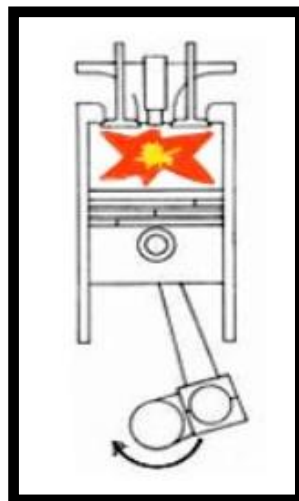
El proceso de compresión es el momento en el que el pistón se encuentra en su periodo de bajada y es cuando se lleva a cabo el periodo de cierre de las válvulas de admisión y de escape y empieza el pistón a subir, comprimiendo la mezcla de aire/combustible, haciendo que dicha compresión genere el aumento de dos factores fundamentales, que son la presión y la temperatura en el interior del cilindro. Cuando ocurre esto, el cigüeñal hace otro giro de 180° y ya de esta forma se ha completado la primera vuelta del ciclo. Con dicho giro se hace otro movimiento de 90° pero durante este periodo no hay apertura de válvula como se ve en la imagen que se muestra a continuación:



**Ilustración 13:** *Proceso de compresión del motor de gasolina de 4T convencional. Fuente: [14]*

### **3.1.2.2.3. Proceso de ignición de mezcla del motor de gasolina de 4T:**

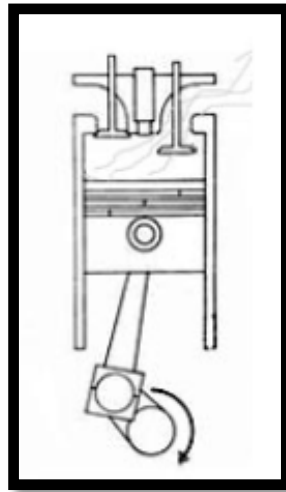
El proceso de explosión o encendido es el momento clave en el que el motor realiza un trabajo útil y es el punto en el que el motor arranca, ya que se ha producido el encendido de la mezcla de aire/combustible, produciéndose como se dijo con anterioridad el triángulo del fuego. Se puede ver en la siguiente imagen dicho proceso:



**Ilustración 14:** *Proceso de ignición de mezcla del motor de gasolina de 4T. Fuente: [14]*

### **3.1.2.2.4. Expulsión de gases del motor de gasolina de 4T:**

Durante el proceso de expulsión de los gases de escape, en el caso del motor de gasolina de 4T se expulsan al exterior por medio de unos conductos determinados todos los gases producidos en el proceso de la combustión de la mezcla de aire/combustible. Este proceso ocurre cuando el pistón sube y empuja dichos gases por el conducto que hay en la culata hacia el exterior por medio de la apertura del escape a través del accionamiento de la válvula que permanece abierta cuando el motor se encuentra en el recorrido de subida hacia el punto muerto superior "PMS", el cual es accionado por el eje de camones, haciendo que de manera progresiva se lleve a cabo las respectivas aperturas de las válvulas de admisión para que se produzca la entrada de combustible en el cilindro y se repita el ciclo. Vemos claramente en la siguiente imagen cómo se lleva a cabo el proceso de escape:



**Ilustración 15:** *Expulsión de gases del motor de gasolina de 4T. Fuente: [14]*

## **3.2. Uso de motores MEC y MEP con inyección de agua:**

Hay muchos tipos de vehículos que se usan a diario, que pueden ser tanto coches, aviones o incluso herramientas que son movidas gracias a la explosión que produce el cilindro de un motor de combustión interna. Actualmente el diseño de estos motores no es rudimentario como lo era hace muchos años tanto en el caso de los MEC como de los MEP, cuyos objetivos eran:

- ⇒ Aumento del rendimiento.
- ⇒ Aumento de prestaciones.
- ⇒ Reducción de emisiones.

El medio por el cual se inyecta el combustible en los motores MEC en la actualidad es de forma directa, la mayoría con cuatro válvulas por cilindro y la tecnología que se emplea es muy avanzada para el sistema de sobrealimentación. Uno de los graves problemas de estos motores es la contaminación que generan, y no por la cantidad de CO<sub>2</sub> sino la más perjudicial, el NO<sub>x</sub>, y muchas otras partículas. Como vimos al principio del trabajo en la tabla que se ha plasmado, vemos que con las normas que se han creado, la fabricación de los motores se ve sometida a someterlos a un postratamiento para ser homologados y poder ser instalados en los vehículos. La innovación creada en los motores MEP es muy sencilla dado que se basa en el mismo sistema de inyección de combustible de forma directa en el interior del cilindro igual que el resto de los motores por compresión, pero no solo se está optando por integrar un sistema de postratamiento sino también disminuir el caballaje del motor y compensando esa bajada de caballaje con una sobrealimentación, si comparamos los beneficios del motor MEP y MEC, hay que tener en cuenta que los MEP tienen un bajo rendimiento y su consumo específico. Como opinión personal, se debería de aumentar el rendimiento para aumentarlo se debe tener en cuenta para ello la relación de compresión y así, de ésta manera, no es necesario la necesidad de una chispa para inflamar la mezcla generada en el interior del cilindro.

#### **4. Material y metodología:**



## 4. Material y metodología:

### 4.1. Material:

Para favorecer el desarrollo del TFG se han colocado numerosas fotos del estudio realizado en el motor "C1J" del Renault 5 GT Turbo. De esta manera podemos hacer mucho más ameno el desarrollo del mismo, tratando de manera clara y concisa algo que es muy poco usual ver en funcionamiento.

#### 4.1.2. Características del Renault 5 GT Turbo:

Características del Renault 5 GT Turbo	
Nº. de puertas:	3
Batalla:	241 cm
Longitud:	359.1 cm
Anchura:	159.6 cm
Altura:	136.7 cm
Coefficiente Cx:	0.36
Frenos delanteros:	Discos ventilados
Frenos traseros:	Discos macizos
Neumáticos delanteros:	175/60 R13
Neumáticos traseros:	175/60 R13
Peso:	850 kg
Relación Peso/Potencia:	7.4 kg/hp
Volumen de maletero	233-617.5 L
Suspensión delantera:	McPherson struts, stabilizer
Suspensión trasera:	Deformable V-shaped axle with torsion bars

**Tabla 2:** Características del Renault 5 GT Turbo. Fuente: [5]

### 4.1.3. Características del motor “C1J” del Renault 5 GT

#### Turbo:

Características del motor “C1J” del Renault 5 GT Turbo	
Motor:	4 lineal
Código de motor:	C1J 782
Combustible:	Gasolina
Alimentación:	Carburador Solex 32 DIS
Situación:	Transversal
Cilindrada:	1397 cm <sup>3</sup>
Diámetro x Carrera:	76x77 mm
Válvulas:	8 válvulas
Sobrealimentación:	Turbo Garrett T2
Relación de compresión:	7.9
Potencia:	113 hp
Par máximo:	165 Nm
Tracción:	FWD
Caja de cambios:	5 velocidades manual

**Tabla 3:** Características del motor “C1J” del Renault 5 GT Turbo. Fuente: [5]

## 4.2. Metodología:

Si tenemos en cuenta el estudio principal llevado a cabo en este Trabajo de Fin de Grado, debemos hacer hincapié sobre dónde proviene el motor “C1J”. Este motor en el cual se van a llevar a cabo las respectivas pruebas con la agregación de agua está colocado bajo el capó de un Renault 5 GT Turbo. A continuación, mostramos una imagen muy bonita de este motor con tanta historia:



**Ilustración 16:** Motor de Renault 5 GT Turbo. **Fuente:** Trabajo de campo.

#### **4.2.1. Documentación bibliográfica:**

Este Trabajo de Fin de Grado se ha basado en la búsqueda de información mediante manuales, libros de texto, páginas de internet, etc. Mucha de la información redactada en el desarrollo del mismo ha sido gracias a la búsqueda de información antigua.

## **5.Resultados:**

## 5. Resultados:

Como el propio apartado nos indica veremos los resultados que conlleva el empleo de la agregación de agua en el interior del cilindro y los respectivos beneficios o ventajas al igual que las desventajas que puede generar un mal uso de la misma:

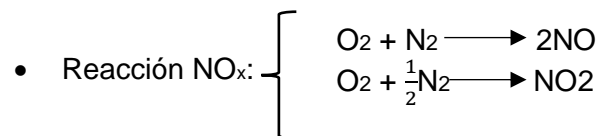
### 5.1. Aplicaciones de la inyección de agua:

Para inyectar el agua en el momento preciso, como se dijo con anterioridad, la mezcla de aire/agua+combustible es generada en el interior del cilindro. Este tiempo de creación de la mezcla se tiene en cuenta por medio del ángulo generado por el propio cigüeñal, pero las condiciones de presión y temperatura son creadas por el propio proceso de inflamación de la mezcla en el interior del cilindro. Otros parámetros a tener en cuenta son el ángulo con respecto a la horizontal y su modo de representación, teniendo como referencia la base de la camisa del cilindro. Esto es empleado tan solo para el motor "C1J" del cual se va a llevar a cabo dicho estudio, ya que para otros motores será muy diferente dependiendo de lo que se quiera obtener. El momento en el que se inyecta agua, hay un cambio brusco en el interior del cilindro dado que se generan variaciones como se describe en los siguientes apartados:

⇒ Reducción en la temperatura máxima, siendo esto el motivo por el que aumentan las relaciones de compresión, consiguiendo un aumento de rendimiento y de la potencia. Para la obtención de dicho rendimiento se emplea un rendimiento

modelo:  $1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$

⇒ Para reducir la cantidad de  $\text{NO}_x$ , en lo que se refiere a emisiones, pues se intenta reducir la temperatura máxima en el interior del cilindro:



- La temperatura de generación es aproximadamente  $1400^\circ\text{C}$ .

⇒ Si se tiene en cuenta el desarrollo termodinámico durante la inyección del agua se puede tener un mejor control de dos factores importantes como es la temperatura y la presión.

⇒ Debido a la reducción de la temperatura de los gases generados durante la combustión hay una mejoría:

- Si recordamos los Ciclos de Carnot vistos durante la asignatura de termodinámica dada por el profesor Brito, los lugares de trabajo óptimo de una máquina térmica son tanto el foco caliente como el foco frío. Si ponemos a funcionar dicha máquina y vemos que el nivel de temperatura entre el foco caliente y el foco frío es grande, la cantidad de energía positiva que en este caso se traduce en trabajo es mayor. Es por ello por lo que se tiene en cuenta la ecuación del rendimiento desarrollada para el Ciclo de Carnot que hemos hablado:

$$\mu = 1 - \frac{T_c}{T_f}$$

- Si tenemos en cuenta el valor de la relación de compresión, cuanto mayor sea en el caso de la sobrealimentación, más se reduce la temperatura de los gases generados por la combustión.
- ⇒ Si queremos ganar una mayor densidad y se aumenta la cantidad de mezcla de aire/combustible, debemos hacerlo intentando disminuir la temperatura en el conducto de admisión.
- ⇒ Para generar mucho más oxígeno se disocian átomos de H<sub>2</sub>O para conseguir oxidar gran parte del combustible.
- ⇒ Un control de temperaturas y reducción durante el proceso con lo que hay menores pérdidas térmicas y es debido a la temperatura, siendo el desgaste el cilindro es mucho menor. A continuación, se da a ver una gráfica donde se ve que aumenta la temperatura en el interior del cilindro a lo largo del ciclo:

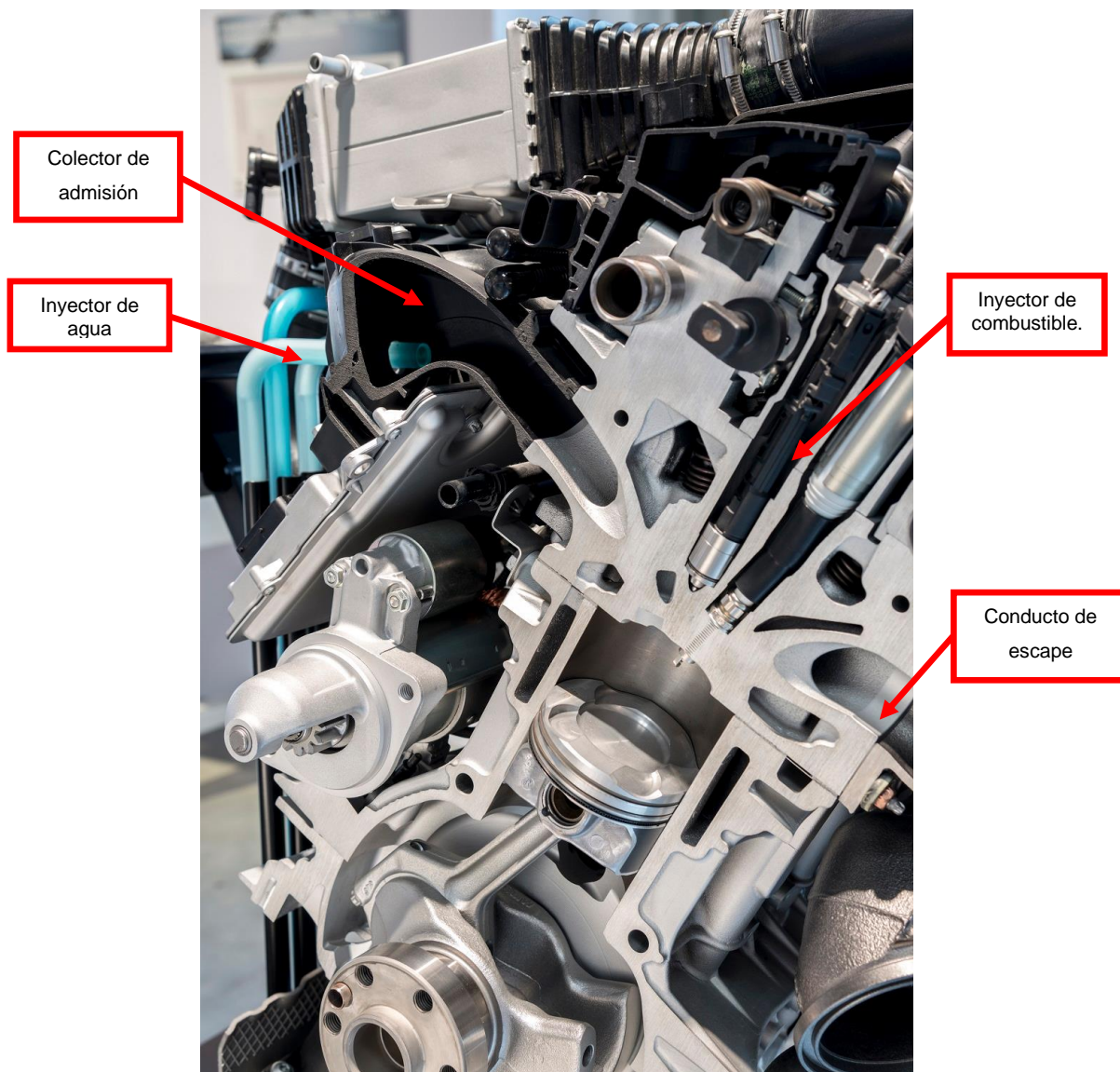


**Ilustración 17:** Aumento de temperatura dependiendo del combustible. Fuente: Trabajo de campo.

Dependiendo del método de inyección empleado puede ser más o menos apto, de tal manera que la elección del sistema es considerada como algo añadido.

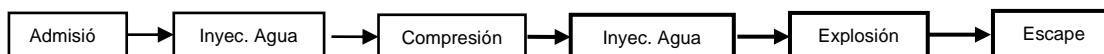
### **5.1.1. Inyección en el orificio de admisión:**

Como el propio enunciado nos indica, el agua se inyecta en el colector de admisión. Las características del inyector son muy diferentes a un inyector de combustible dado que el diámetro del inyector de agua es mucho mayor, alrededor de 0.50mm y la presión a la que es tarado para el funcionamiento es de 175 atm. Como es el caso de la inyección del combustible, la inyección de agua en el conducto de la admisión se lleva a cabo en el punto muerto superior "PMS", como ocurrió en el banco de prueba con el motor "C1J", que en la primera prueba contaba con un inyector de agua excesivamente grande y disminuía la curva de potencia muchísimo, en cambio en la prueba definitiva se cambió el inyector de agua y se ve claramente como aumenta el caballaje del motor. De esta manera sabemos que si se inyecta gran cantidad de agua se corta el encendido dado que se humedece la mezcla y se corta la explosión. Se puede ver en el sistema inventado por la marca BOSCH y usado en el motor del BMW, que se trata de un sistema con bomba externa que es accionada de forma eléctrica por medio de un motor eléctrico de diminutas dimensiones. Esta agua es transportada a los inyectores por tubos de plástico o metal que soporta la presión de 175 atm aproximadamente.



**Ilustración 18:** Partes de un motor con agregación de agua. Fuente: Trabajo de campo.

En esta explicación nos referimos a un motor de 4T, pero en el siguiente esquema veremos como pasamos a un motor de 6T:

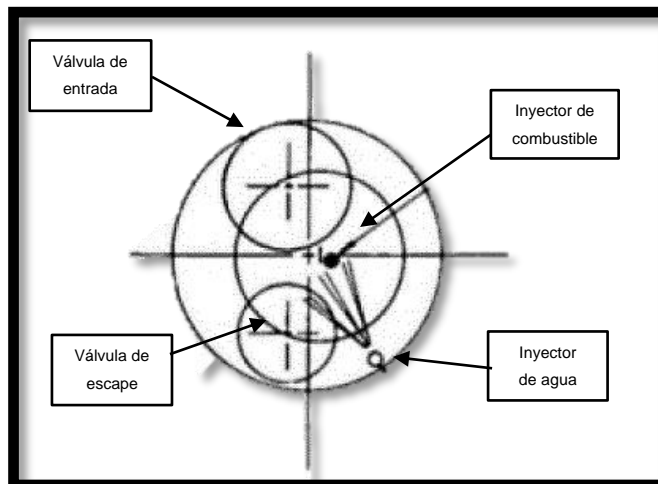


### **5.1.2. Inyección de agua directa en el interior del cilindro:**

Este método se lleva a cabo por medio de una bomba y un inyector independientes unos de otros. En este caso se trata de una bomba de inyección común, en la que se emplean inyectores cuyos orificios de pulverizado son estrechos de un diámetro de 0.32mm y mucho mejor si se trata de tres orificios. El régimen de trabajo es a una presión de 168 atm aproximadamente, pero para llegar a esta presión se intenta contar con una bomba auxiliar cuyo movimiento se logra bien por el movimiento del cigüeñal o de manera eléctrica. Esta inyección es suministrada al inyector por medio de

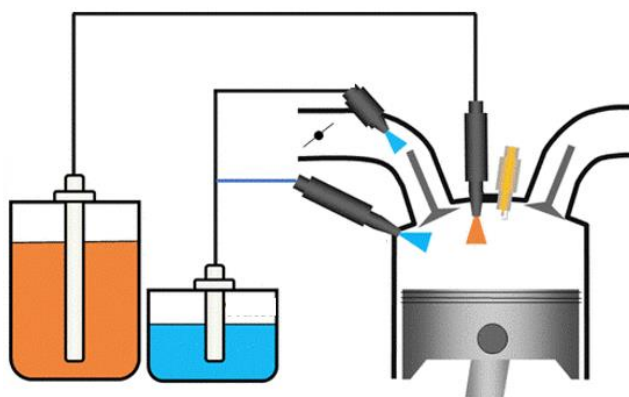


tubos o conductos. La gran ventaja de este sistema es que permite regular la cantidad de mezcla y determinar el momento en concreto adelantando o atrasando el momento de inyección de agua en función de la finalidad que se quiere obtener, como vemos en la siguiente imagen:



**Ilustración 19:** Representación gráfica de la inyección en la cámara de combustión. Fuente: Trabajo de campo.

En primer lugar, en el estudio realizado por “Fabio Bozza” su principal objetivo es lograr inyectar agua en el interior del cilindro. Dicho motor de estudio cuenta con 2 cilindros y 8 válvulas las cuales son dos de admisión y dos de escape. El motor que ha sido empleado para el estudio que se quiere realizar se compone de un sistema electrohidráulico y cada cilindro cuenta con un conducto de inyección. En el estudio la inyección del agua se realiza en el mismo punto en el que se lleva a cabo la mezcla aire/combustible, que es el punto muerto superior “PMS”, para generar un mejor rendimiento del motor en dicho estudio se lleva a cabo la inyección de agua con sobrealimentación como es el caso del “C1J” del Renault 5 GT Turbo. La velocidad máxima de giro del motor es de 255.000 rpm, con lo cual sabemos que este diseño es muy eficiente.



**Ilustración 20:** Representación del uso de agua en el cilindro. Fuente: [15]

En segundo lugar, en el estudio realizado por “Mingrui” se estudia un sistema de inyección por el cual se inventa un inyector que separa el agua del combustible y eso es controlado por medio de una programación “ECU”. Como dije con anterioridad, este sistema es usado por los ingenieros de BOSCH para el desarrollo de sus nuevas innovaciones de motores cuyo objetivo es conseguir una mayor potencia y reducir las emisiones. Este estudio no es muy común dado que el motor en el que se lleva a cabo el estudio es de un cilindro de arranque provocado. En cambio, si tenemos en cuenta los estudios realizados por otros investigadores hasta no hace muchos años ponen claramente sobre la mesa que si el estudio se realiza con un motor cuyas características del cilindro sean diferentes a lo habitual, en tal caso asimétrico, produce un gran aumento de turbulencias del fluido durante la mezcla y genera una mayor homogeneidad.

En tercer lugar, en el estudio realizado por “Fabian Hope”, se puede ver claramente como explica el sistema de inyección que se desarrolla en el cilindro cuyos beneficios al emplear dicho estudio es una mayor cantidad de rendimiento y la eficiencia generada por el sistema es mucho mayor en el caso de inyectar agua, dado que se emplean ciclos no convencionales. Un ciclo muy empleado es el de “Miller”. Fabian en su estudio establece el sistema de inyección de agua en un motor MEP de un solo cilindro con su respectivo conducto de admisión y de escape, en el que dicho motor cuenta con una relación de compresión de 13,5 bares aproximadamente. Esta relación de compresión es más elevada de lo habitual en comparación con los motores de encendido producido, generando este sistema un mayor rendimiento térmico del ciclo.

En cuarto lugar, si continuamos a lo largo del tiempo, es en el año 2014 donde empiezan a desarrollar estudios sobre la aplicación del agua en el interior del cilindro. Según el estudio realizado por “Zhi-Jun Wu”, en su respectivo estudio tuvo en cuenta la cogeneración y la generación de electricidad, por lo que inventó un sistema de alta eficiencia donde se usaba Oxyfuel en combinación con la inyección de agua, dicho estudio se realizó principalmente para un motor (MEP). El agua usada para ser inyectada en el interior del cilindro se hace pasar por dos etapas. Primeramente en la etapa de refrigeración el motor es refrigerado por medio de esta agua a través de las paredes del bloque de motor y, en la segunda etapa, dicha refrigeración se realiza en el conducto de escape (un ejemplo muy común es el caso de los motores marinos que llevan refrigeración de agua dulce y agua salada, pues muchos de ellos disponen de refrigeración en la salida del cono de escape para intentar refrigerar dicho conducto). Aunque no se crea, actualmente se usa como sistema positivo en la mejora de la combustión y mejora del mismo rendimiento del motor, como por ejemplo en las culatas

de los nuevos motores empleados por Ford donde la salida de escape va refrigerada por el propio sistema de refrigeración del motor. Para ello este nuevo sistema incluye termostato de doble función para intentar mantener la temperatura del motor en un punto permanente como puede ser aproximadamente 80°C. Sin desviarnos del estudio, el agua se inyecta en el cilindro a una temperatura superior que los estudios realizados con anterioridad, consiguiendo con esta elevada temperatura se consigue dar uso a este calor específico del agua que ha sido inyectada en el interior del cilindro. A continuación, vemos una reacción que muestra claramente este cuarto estudio:

- Reacción Oxyfuel:  $26 CxHy + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$

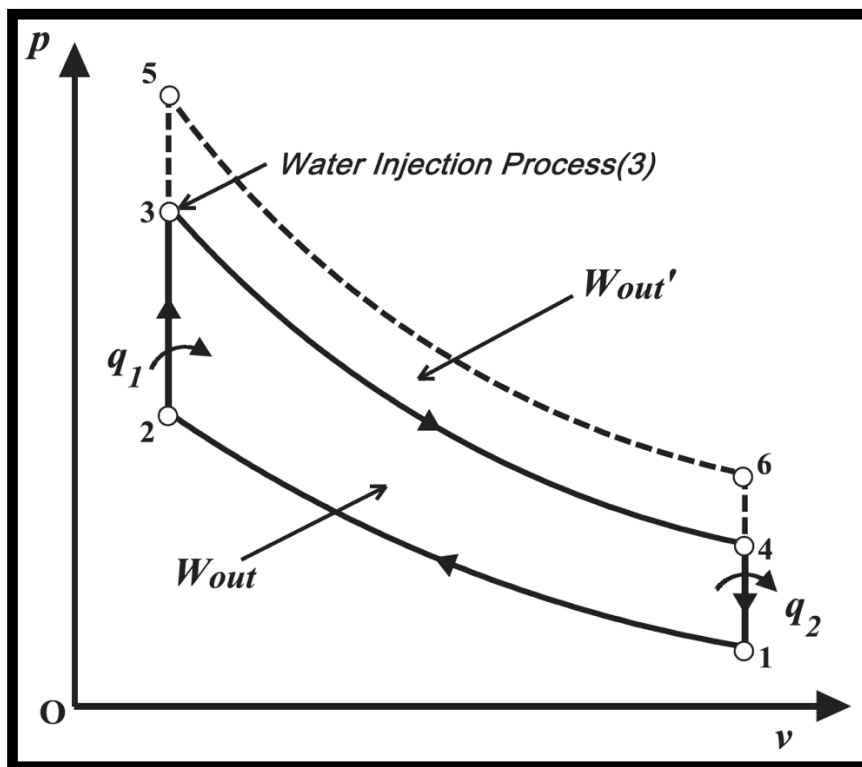


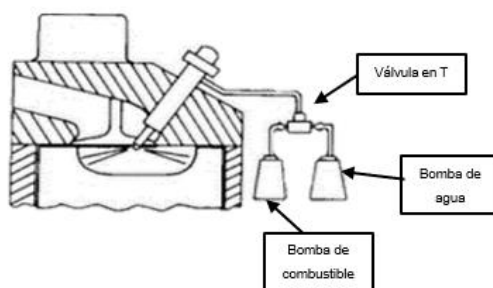
Ilustración 21: Sistema de origen y con aporte de agua. Fuente: [16]

Si todo lo visto hasta ahora lo llevamos a la aplicación del ámbito marítimo, los estudios realizados por "B. Tesfa" en los que emplea un motor de compresión y se usa como combustible para su funcionamiento el biodiesel, e incorporando a esta combustión la inyección de agua, cuyo beneficio obtenido es la reducción de  $NO_x$ . El uso del biodiesel mejora de manera considerable el empleo de este método, otro de los beneficios del uso de este método es que se puede emplear como combustible el Diesel sin afectar al funcionamiento del propio motor. Uno de los grandes problemas que presenta el uso de este combustible renovable, es el aumento de temperatura, provocando una abundancia en la creación de  $NO_x$ . Para reducir de manera considerable la cantidad de emisiones se inyecta agua, haciendo que el uso del

biodiesel sea mucho más apto con el medio ambiente, viendo que en la actualidad se está atacando bastante en cuestión de las emisiones.

Empleando como inyector de agua el propio inyector de combustible, el agua se inyecta de forma más directa en el interior del cilindro. Este inyector dispone de unos orificios para inyectar el agua de manera comunitaria con el propio combustible. Todo este sistema se realiza por medio de varios elementos externos:

1. Un depósito de agua intermedio donde se lleva a cabo liga el agua con combustible en la cantidad que se ha deseado, luego dicha mezcla es bombeada por medio de un conducto de cobre hasta los inyectores del cilindro de dicho motor.
2. Está compuesto de dos bombas. Éstas son independientes dado que se compone de una para el combustible y otra que bombea el agua desde su depósito correspondiente y se unen de manera independiente antes de que llegue al inyector por medio de una válvula en T. Se puede ver lo que se ha explicado en la siguiente imagen:



**Ilustración 22:** *Inyección de agua directa en el cilindro. Fuente: Trabajo de campo.*

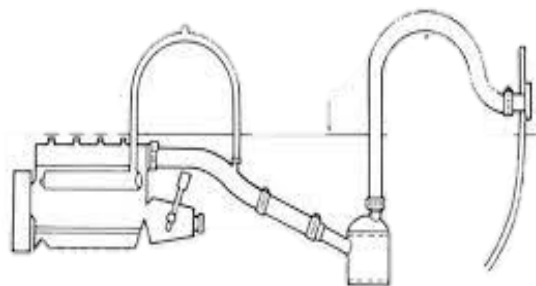
Si tenemos en conocimiento el estudio realizado por “Tesfa” genera una solución en la cual se inyecta en el interior del cilindro del motor agua disuelta con combustible, siendo esencial la mezcla de esta agua con un agente emulsionante (un ejemplo es el estudio realizado en la inyección de agua del motor del Renault 5 GT Turbo donde se mezclaba el agua con alcohol, usando éste último como agente emulsionante) para generar una buena homogeneización de la mezcla agua/combustible. El estudio pone un contra y es que el empleo de este sistema estudiado necesita de un complejo control, un control llevado a cabo por un caudalímetro tanto para el caso del agua como para el combustible, para realizar de forma exacta la mezcla del agua/combustible y así no se realizarlo en cantidades incorrectas.

### **5.1.3. Inyección de agua en el orificio o conducto de gases:**

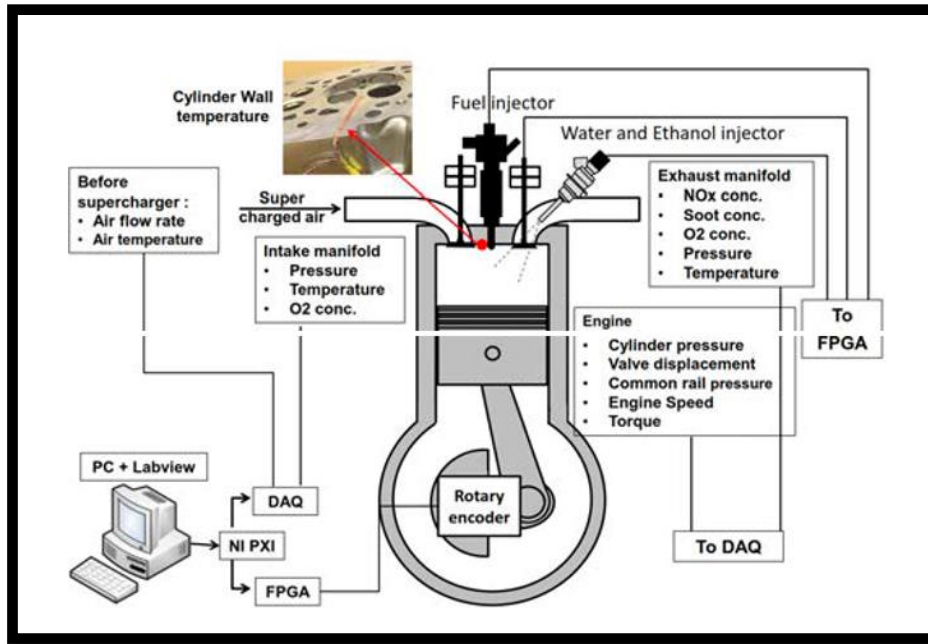
Para evitar los errores generados por los sistemas anteriormente descritos se intenta crear un sistema que inyecta agua en la salida o conducto de los gases de escape, cuya finalidad es reducir la entalpía del vapor de agua producido y reducir la cantidad de emisiones de  $\text{NO}_x$ . Dejando a un lado la cantidad de emisiones, una cosa muy importante y que no se debe de ignorar es la temperatura y, en este punto, se intenta reducir la temperatura durante la combustión.

En el momento que se inserta el agua en el interior del cilindro por medio del conducto por donde se expulsan los gases de escape a través del uso de un inyector, se inyecta el agua a alta presión. Gracias a la apertura de la válvula de escape, dicha agua inyectada entra en el interior del cilindro, aunque hay que tener en cuenta que hay motores que cuentan con la recirculación de los gases producidos durante la combustión que se mezclan con el aire introducido a través del colector de admisión.

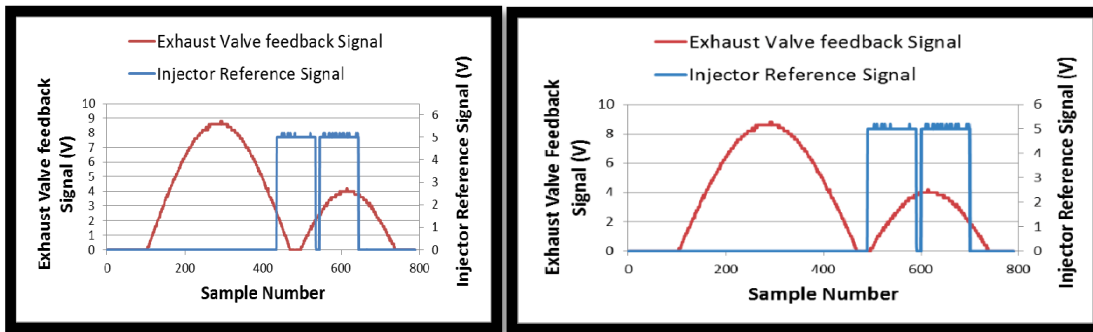
El vapor de agua producido en el interior del cilindro es uno de los fenómenos que se intenta acabar, además de disminuir el agua generada durante el proceso de combustión. Dicho objetivo fue estudiado por "Bozza", donde sus dos elementos principales son un inyector y una bomba de alta presión, cuyo inyector suministra agua en el conducto de los gases de escape. Por el contrario, en la actualidad la bomba de alta presión no es accionada mecánicamente sino eléctricamente. Durante el desarrollo del estudio llevado a cabo por "Bozza" se ve como la apertura de ambas válvulas tanto de admisión como de escape son independientes. La gran ventaja es que su invento regula la temperatura sin generar ningún tipo de efecto y haciendo que se mantenga en los rangos apropiados como se ve en el esquema que se muestra a continuación:



**Ilustración 23:** *Inyección de agua en el conducto de escape. Fuente: Trabajo de campo.*



**Ilustración 24:** Inyección de agua en el conducto de escape de manera electrónica. Fuente: [17]



**Ilustración 25:** Gráficas de la señal originada al inyectar agua en el conducto de escape. Fuente: [17]

Durante este proceso se emplean distintas variables, que tienen que ser combinadas de forma óptima para obtener buenos resultados:

- ⇒ Cantidad de agua en el interior del cilindro.
- ⇒ Cantidad de tiempo de inyección.
- ⇒ Momento de inicio de inyección.
- ⇒ Cantidad de gases de EGR en tanto por ciento.

Para potenciar el uso del ciclo de Rankine, el motor se pone en funcionamiento por medio de los gases producidos durante la combustión, cuyo invento fue producido por “Zhi-Jun Wu”. Ambos comparten la misma idea empleando para el estudio un motor de un cilindro de encendido provocado cuya combustión se genera por medio del propano. Empleando la inyección de agua tal y como habían dicho, se dan cuenta de, que no se generan gases con condensación y además la reducción de la temperatura

es mucho menor y, debido a estas ventajas, favorece la sobrealimentación y un aumento de la densidad.

Sin embargo, “Lexhong Fu” en su estudio ve claramente un aumento de la eficiencia durante el desarrollo del ciclo termodinámico. En su estudio se usa el ciclo de Rankine junto con el de combustión interna, cuya obtención es un ciclo de calor de gases de escape que produce un funcionamiento correcto del MCIA. Como resultado de todos estos estudios que hemos nombrado anteriormente, se puede ver con claridad que durante la compresión se produce una rápida vaporización de dicha agua que permite ver una mejoría en el rendimiento térmico y se ve una variación en función del sistema de inyección empleado. A medida que se va inyectando agua se ve un aumento de la presión media de manera muy considerada, pero, por el contrario, hay una reducción en el número de emisiones con la agregación del agua.

Si se inyecta una gran cantidad puede producir graves problemas en la estabilidad del funcionamiento del motor, haciendo que la variabilidad aumente tal y como vimos durante las pruebas del motor del Renault 5 GT Turbo, por lo que hay que inyectar muy poco y en un tiempo muy reducido, de tal manera que durante el estudio se puede ver que si se inyecta gran cantidad de agua el motor decae y se llega a parar debido a que esa gran cantidad de agua le está afectando a la combustión. Una de las cosas importantes a tener en cuenta es lo que se refiere al punto en el que se inyecta el agua, ya sea en la admisión o en el escape, pues estos sistemas son muy dependientes de una atomización adecuada.

## **5.2. Inyección dependiendo del tipo de motor empleado:**

En este punto debemos de tener en cuenta el tipo de motor que se desea usar, “MEP” o “MEC”, ya que dependiendo del que se use se emplea un tipo de inyección u otra.

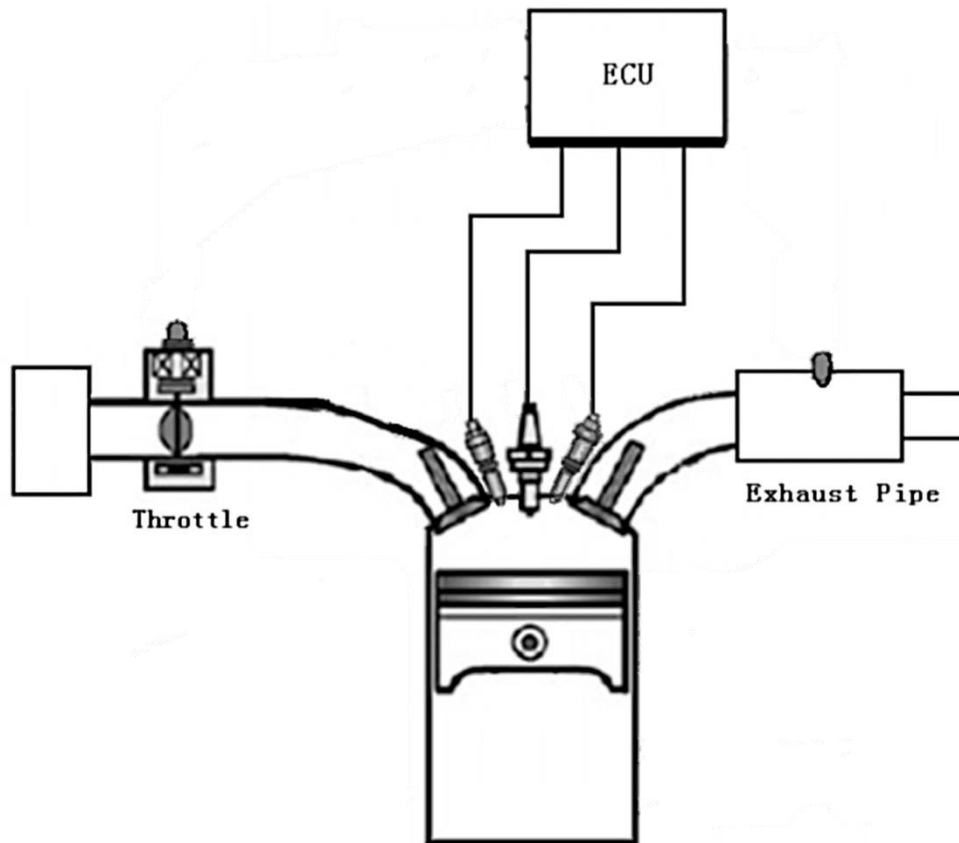
### **5.2.1. Motor de chispa o provocado:**

Al inyectar agua durante el proceso de la combustión lo que se quiere lograr con ello es disminuir la temperatura que hay en el interior del cilindro y del propio combustible. Estos motores cuyo arranque o puesta en marcha se realiza gracias a la creación de una chispa se usan muy a menudo en la automoción, en el transporte y en muchos otros vehículos que hasta nosotros mismos podemos desconocer. El combustible que se emplea en la actualidad contiene muchos elementos que son

beneficiosos a la hora de encenderse, pero el más que nos interesa en este momento es el octanaje (más adelante trataremos el motor "C1J" del Renault 5 GT Turbo donde vemos claramente que la finalidad de inyectar agua en la entrada de aire del propio motor es para disminuir la temperatura en el interior del cilindro del propio motor debido al elevado octanaje que contiene dicho combustible y veremos la diferencia de caballaje que nos da sin dicha inyección de agua y la incorporación de la misma) y es muy importante su uso en motores con unas altas prestaciones, en la cual la velocidad lineal de funcionamiento es alta. En estos motores se intenta encontrar un mecanismo que nos da la oportunidad de aumentar de forma considerada la potencia del motor sin necesidad de aumentar la cilindrada del mismo, ya que al aumentar la cilindrada generaría un aumento del consumo y no reduciríamos las emisiones que es lo que nos interesa. En el ejemplo del Renault 5 GT Turbo, al ser empleado para carreras de competición lo que les interesa en este caso es el aumento de potencia y con ello, como se comentó, el aumento del consumo de combustible es considerable, pero se reducen de manera considerable las emisiones por medio de la inyección de agua.

Para lograr reducir la temperatura en el interior de la cámara de combustión de dicha mezcla agua/combustible se realiza de forma directa una inyección de agua en el interior de dicha cámara, pero tiene una gran ventaja si se emplea con un sistema, dado que beneficiaría en los efectos, debido a que se controlan mucho mejor las temperaturas y son mucho menores las generadas.





**Ilustración 26:** Motor de encendido por chispa con inyección de agua con control eléctrico. Fuente: [18]

El funcionamiento de este sistema a un bajo régimen de carga no es muy recomendable dado que el motor se encuentra inestable. En cambio, este tipo de sistema es usado ya que en los motores “MEP” siempre se suele trabajar con unos valores estequiométricos y a veces se trabaja sobre dichos valores. Muchas veces se trabaja con una elevada densidad y por tanto hay una probabilidad muy alta de que se generen inquemados en la combustión. Si la generación de inquemados es abundante este sistema es poco rentable y, mientras no se alcance un 35% del grado de carga el motor de combustión interna no tendrá un funcionamiento estable. El grado de carga en el motor es muy importante para la efectividad del sistema de inyección, por lo que es muy importante el control del sistema de inyección a través de control electrónico por medio de una “ECU” ya que el motor necesita una menor inyección de agua a bajas revoluciones, esto es gracias al sensor de vueltas de giro de cigüeñal y una “ECU” que recibe dicha información de giro del motor y de esta forma se hace funcionar el motor de la misma manera que se puede ver en la imagen que se muestra anteriormente. Este sistema es el mismo que se emplea en el Renault 5 Turbo, pero en este caso determinado solo se inyecta agua a altas revoluciones.

### **5.2.2. Motor de arranque por compactación de la mezcla:**

El funcionamiento normal de estos motores se lleva a cabo por medio del ciclo Diesel donde su relación de compresión está alrededor de 19 a los 34 bares de presión, una gran diferencia con respecto a la relación de compresión de los motores que vamos a tratar en este apartado, los cuales están en torno a los 13 bares, muy baja con respecto al motor de ciclo Diesel, debido a esto, su temperatura de funcionamiento es elevada durante el ciclo. Teniendo en cuenta las normativas anticontaminación que tenemos en la actualidad, hace propenso el uso del sistema de agua en motores cuya cilindrada es bastante grande. No hay que tener en cuenta no otro punto sino el más importante que es la producción de  $\text{NO}_x$  en los gases de escape generados dado que son muy elevadas. Usando como medio de reducción de emisiones la inyección de agua obtenemos una reducción del 70% de las emisiones de  $\text{NO}_x$  y esto genera otros beneficios como son evitar errores al catalizar los gases de escape generados durante la combustión y generar un posterior tratamiento que interponen un funcionamiento óptimo del motor, e incluso elevar de forma considerada el importe de compra de un motor.

No solo al emplear el sistema de inyección de agua se reduce las emisiones de  $\text{NO}_x$  sino que además aumenta por otra parte la cantidad de CO.

Si tenemos dos factores importantes como son los que se tienen en cuenta durante el estudio del Renault 5 GT Turbo que son el par y la respectiva potencia del motor, vemos como el compañero Roger a medida que va adelantando o desfasando la chispa mediante un sistema electrónico y la velocidad angular el motor va cambiando mucho su respuesta. De todas formas, la mezcla agua/diesel, genera menos potencia, en comparación con la que se puede lograr inyectando agua y aumentando el consumo de manera considerable, aunque vemos que la temperatura de los gases producidos por medio de la combustión se reduce y de esta forma se alarga la vida de muchos de los elementos que componen el motor.

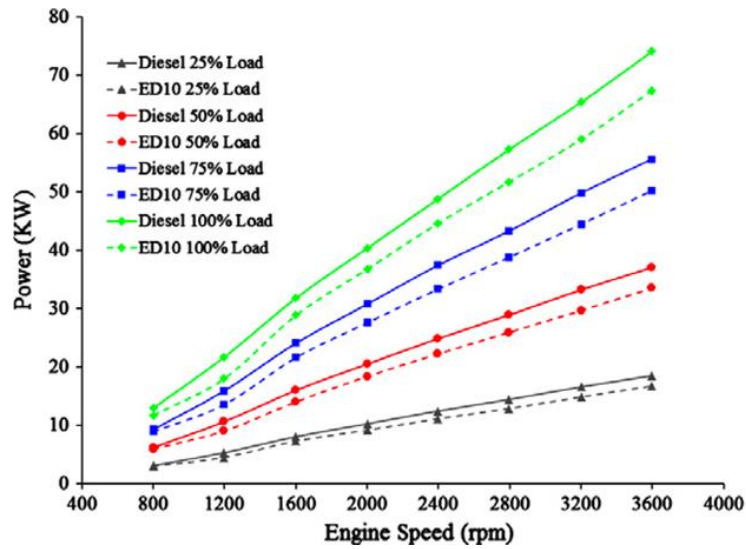


Ilustración 27: Potencia frente a revoluciones en función del combustible. Fuente: [19]

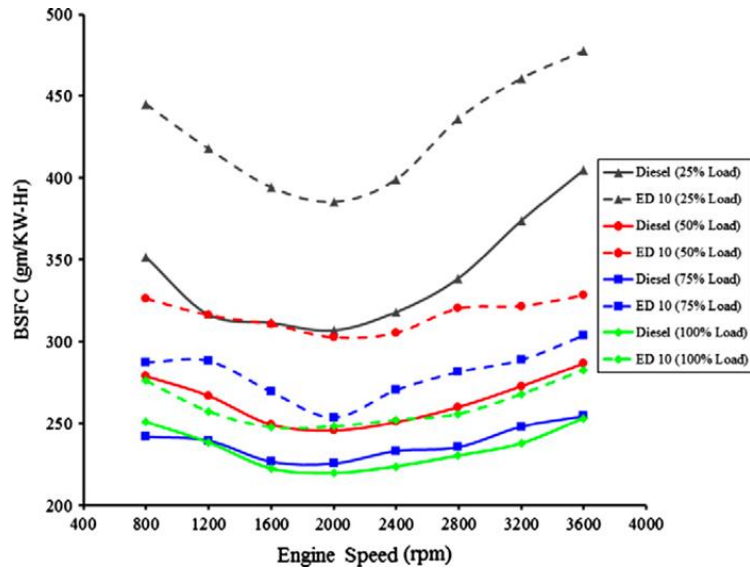
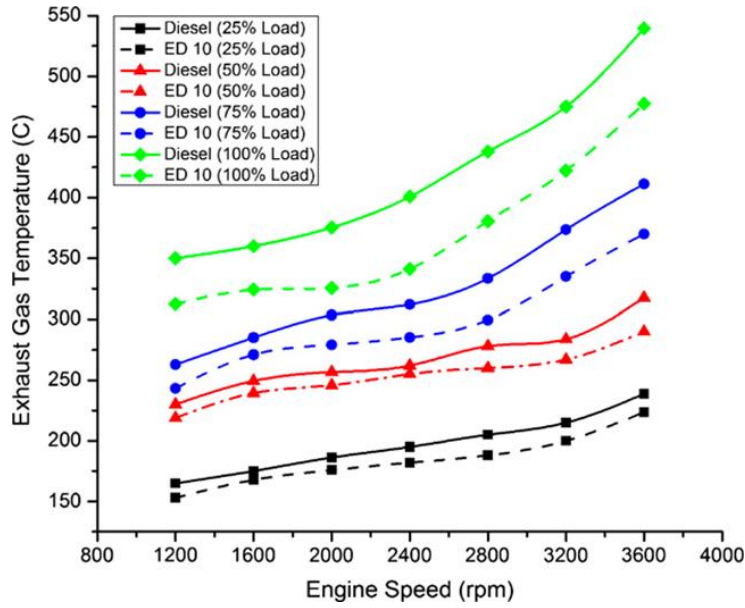
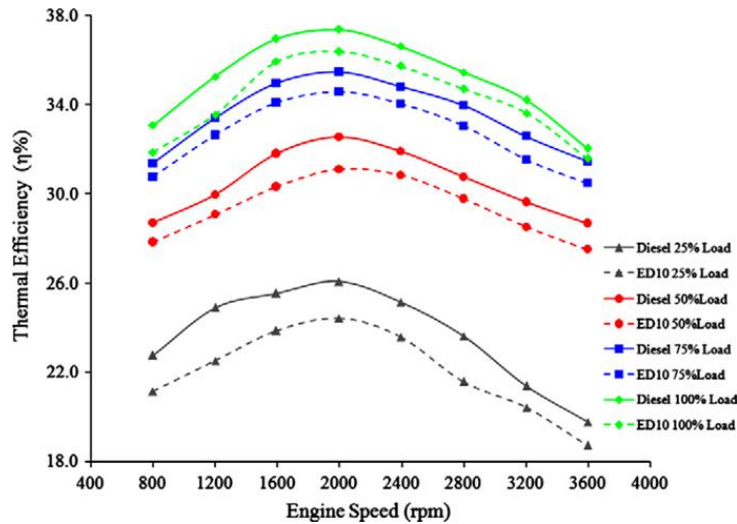


Ilustración 28: BSFC frente a las revoluciones en función del combustible. Fuente: [19]



**Ilustración 29:** Temperatura de los gases de escape frente a las revoluciones en función del combustible. Fuente: [19]



**Ilustración 30:** Eficiencia térmica frente a la velocidad del motor en función del combustible. Fuente: [19]

### 5.2.3. Agua en el conducto de admisión:

A medida que vamos aumentando el cociente de los dos elementos más importantes de este estudio, que son la mezcla de agua/combustible, vemos como con ello se reducen las emisiones de  $\text{NO}_x$ . Si determinamos las ganancias porcentuales, se puede decir que se reduce un 30% de las emisiones de  $\text{NO}_x$ , teniendo una relación de 0,5. Algunas desventajas que se han visto durante estudios generados son las siguientes:

- ⇒ Aumento de las emisiones de CO.
- ⇒ Aumento de las generaciones de cenizas.

⇒ Aumento de las emisiones de HC.

Lo que genera la inyección de agua es un retraso en el encendido del combustible y esto se retrasa aún más si estamos hablando de un motor “MEC”, por lo que el combustible no explota y no se lleva a cabo la reacción. A medida que se le pide más acelerador o más paso de combustible al motor, se genera una mayor cantidad de inquemados. Esto lo podemos solucionar con los siguientes parámetros de manera que se aprovechen esos inquemados de nuevo:

- ⇒ Un aumento de la presión en el interior del cilindro.
- ⇒ Aumento de la presión generada por la sobrealimentación.

Según algunos de los estudios realizados en motores de 2T, se ve notoriamente que se reduce la temperatura durante el proceso de la combustión, donde se puede ver en el siguiente diagrama obtenido por CFD las respectivas temperaturas que se producen en el funcionamiento del motor. Este estudio fue llevado a cabo por “Muhamed I.Hassan”:

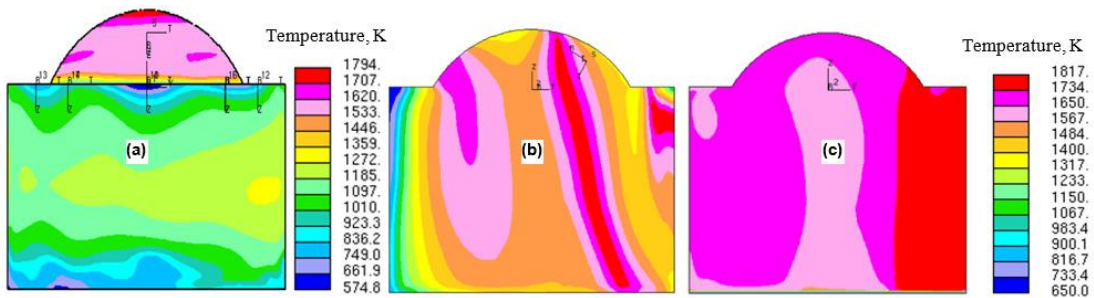


Figure 5: Vertical view, Temperature contours at 90 CAD after TDC; (a) cylinder walls for mw/mf=4.0, (b) cross section for mw/mf=4.0, (c) cross section for mw/mf=0.0

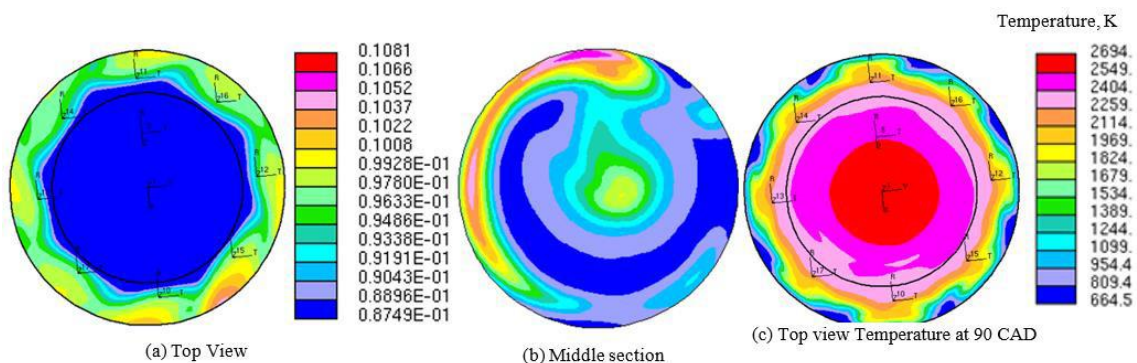


Figure 6: Injected water VOF and temperature profiles; Horizontal sections at 90 CAD for mw/mf=4

**Ilustración 31:** Diagrama CFD de las temperaturas con el motor en funcionamiento. Fuente: [20]

### **5.2.4. Inyección de agua directa en la cámara de combustión:**

Uno de los factores más importantes a tener en cuenta en la inyección de agua es la inyección directa en el interior del cilindro donde se reduce las cantidades de emisiones de NO<sub>x</sub>, algo muy importante y que afecta en gran medida a las emisiones, debido a un factor que anteriormente no se había nombrado mucho que es el cociente del agua/combustible, el cual aumenta la cantidad de emisiones de cenizas y CO, de tal forma que a medida que aumenta el número de revoluciones del motor aumenta dicho cociente.

Este sistema permite ser variable desde el momento en el que se lleva a cabo la penetración del agua en el interior del cilindro y además, hay que tener en cuenta el momento en el que se realiza la inyección, que normalmente se lleva a cabo entre los valores de 10-15 grados posterior al momento en el que el pistón llega a su parte más alta, cuyos beneficios son que reduce la cantidad de NO<sub>x</sub>, de cenizas y CO. Anteriormente, se comentó el estudio realizado por "Bozza", pero vemos como en su estudio se ve una mejoría del sistema que hemos descrito en este apartado para prevenir la autoinflamación del combustible empleado. De tal manera se llegan a las siguientes conclusiones según este estudio de la inyección directa en la cámara de combustión:

**Autoinflamación:** El proceso de autoinflamación se genera debido a las altas presiones y temperaturas generadas en el interior del cilindro. Por lo general hay un aumento de la presión límite que podemos ver en la siguiente ecuación:

$$\Delta P(\text{Autoinflamación}) = \frac{R}{C_v} * \frac{X_u * mf * LHV}{V_{\text{autoinflamación}}}$$

Si combinamos la entrada de agua en el cilindro con un buen diseño de dicho pistón, se produce un aumento de turbulencias y se homogeneiza la mezcla como se ve en las siguientes ilustraciones 32 y 33:

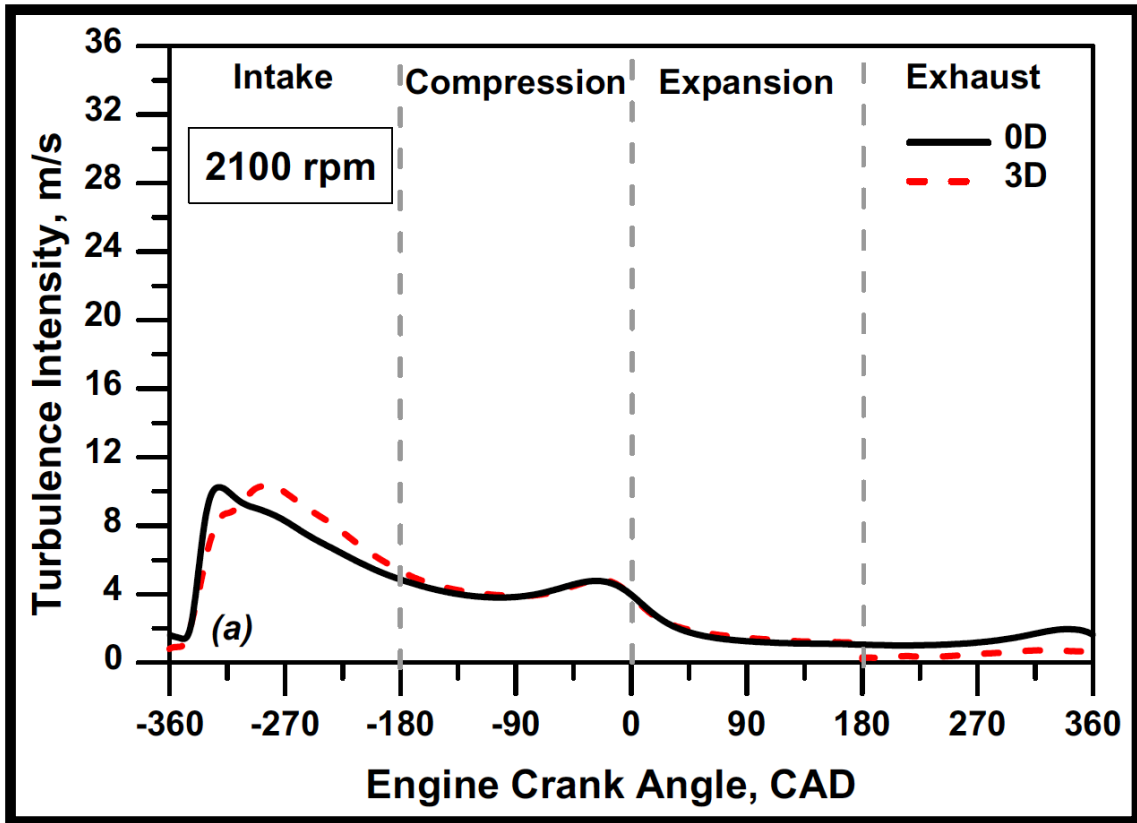


Ilustración 32: Intensidad de turbulencias a 2100 rpm. Fuente: [21]

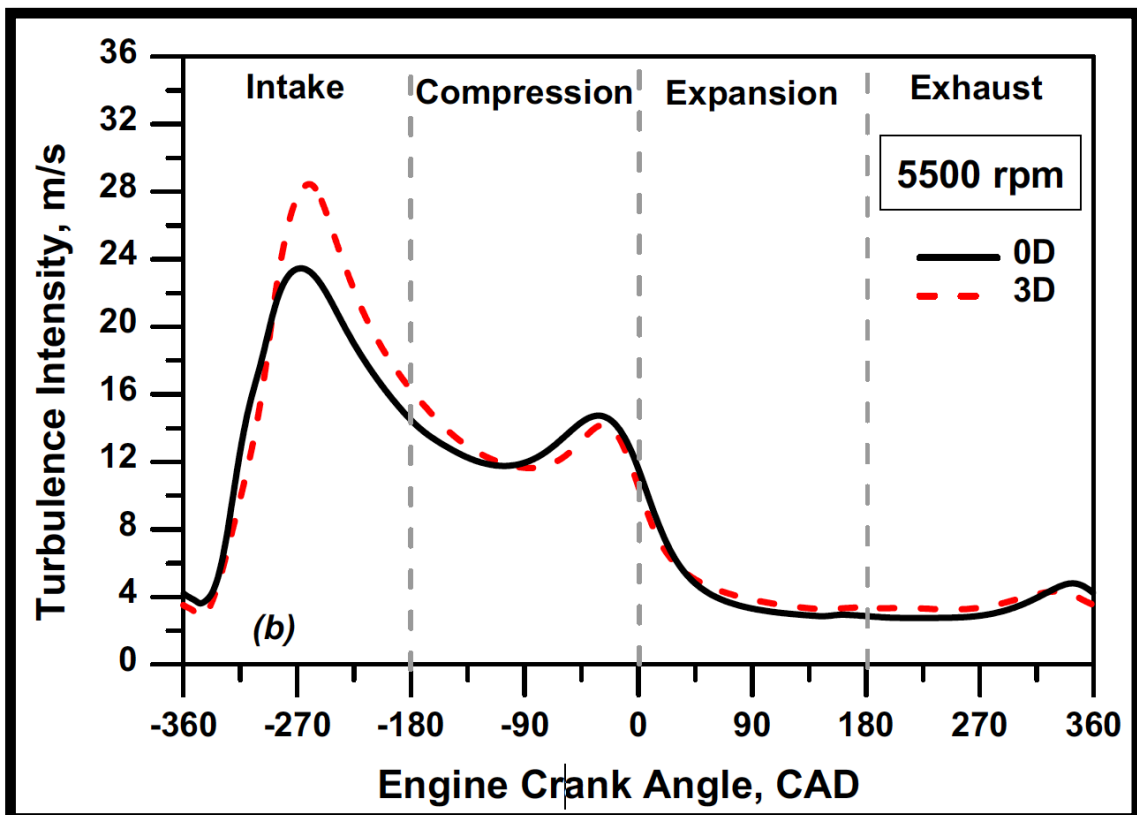


Ilustración 33: Intensidad de turbulencias a 5500 rpm. Fuente: [21]



### **5.2.5. Inyección de agua inmediata mezclada con el combustible:**

Este sistema se compone de dos bombas autónomas compuestas por una válvula que divide el agua. Como vemos en el esquema, se trata de una válvula en T, donde la finalidad es generar la mezcla de la parte alta hasta el agua, lo que genera que no se pueda controlar el momento en el que se lleva a cabo la incorporación del agua en común con el propio combustible. Lo que se consigue con este sistema es reducir las emisiones de NO<sub>x</sub>, una gran diferencia en comparación con las anteriores técnicas empleadas, además de que hay reducciones en las emisiones de CO y cenizas en los gases de escape. A medida que vayamos aumentando las revoluciones debemos aumentar el cociente de agua/combustible, de tal manera que aumenta el retraso del autoencendido con un cociente de 0.8, y la cantidad de gases inquemados es elevado y conlleva una reducción muy grande del rendimiento del motor, Esto también nos permite determinar que hay un valor crítico que no permite el arranque o funcionamiento del motor. Como sabemos el valor que no nos permite el funcionamiento del motor para evitarlo se aumenta la relación de compresión o se le aumenta dicha relación a la sobrealimentación. Dichos valores son los siguientes:

- ⇒ Para valores cercanos a 0.2-0.3, se generan efectos contrarios en comparación con los sistemas explicados con anterioridad. Como hemos visto en el caso del cociente, a medida que aumentamos la cantidad de agua/combustible, más reducción logramos en los gases del compuesto de NO<sub>x</sub> y, en cambio, en este caso aumentan por otro lado las cantidades de CO y las de cenizas. Por el contrario, cuando no se usa la inyección de agua mejoran todas estas medidas. Dicho fenómeno no se ha estudiado aún en gran profundidad, el único estudio que se ha llevado a cabo es que al emplear este sistema se generan unas explosiones no producidas anteriormente en el interior del cilindro y produciendo grandes turbulencias durante la inyección de dicha agua. Como vemos en el estudio llevado a cabo en el Renault 5 GT Turbo, el uso de un emulsionante ayuda positivamente a las prestaciones del propio motor en un 10% y este caso se ha visto reflejado en el estudio llevado a cabo por "G.Greeves" a lo largo del año 1977. Dichas emulsiones se pueden ver reflejadas de manera muy clara en diversas pruebas realizadas con el agua y el aceite con diferentes cantidades del respectivo aceite como vemos:





**Ilustración 34:** Mezcla de agua y aceite a un 10%. Fuente: Trabajo de campo.

### **5.2.6. Uso de sistema de inyección de agua incluyendo sistema de EGR:**

Si realizamos la prueba con un motor cuyo combustible empleado es la gasolina y cuyo medio incluido es el sistema de EGR , estudiado por “Mingrui”, la gran finalidad es crear un alto rendimiento y las características respectivas del motor usado para el estudio son:

- ⇒ Motor de 4 cilindros.
- ⇒ Encendido por chispa.
- ⇒ Sistema de inyección directa desarrollado por la marca Ford:
- ⇒ La relación de compresión es de 13:1.
- ⇒ Número de revoluciones entre 2000-3000 rpm.
- ⇒ Punto de inyección de la aguja del inyector en  $640^{\circ}$  hasta llegar a los  $650^{\circ}$ . Hay que tener en cuenta que con la precisión que se quiere obtener lo que se quiere es tener una buena temperatura en la creación de dicha mezcla y también en el interior del propio cilindro. Se puede ver en la siguiente ilustración 35:

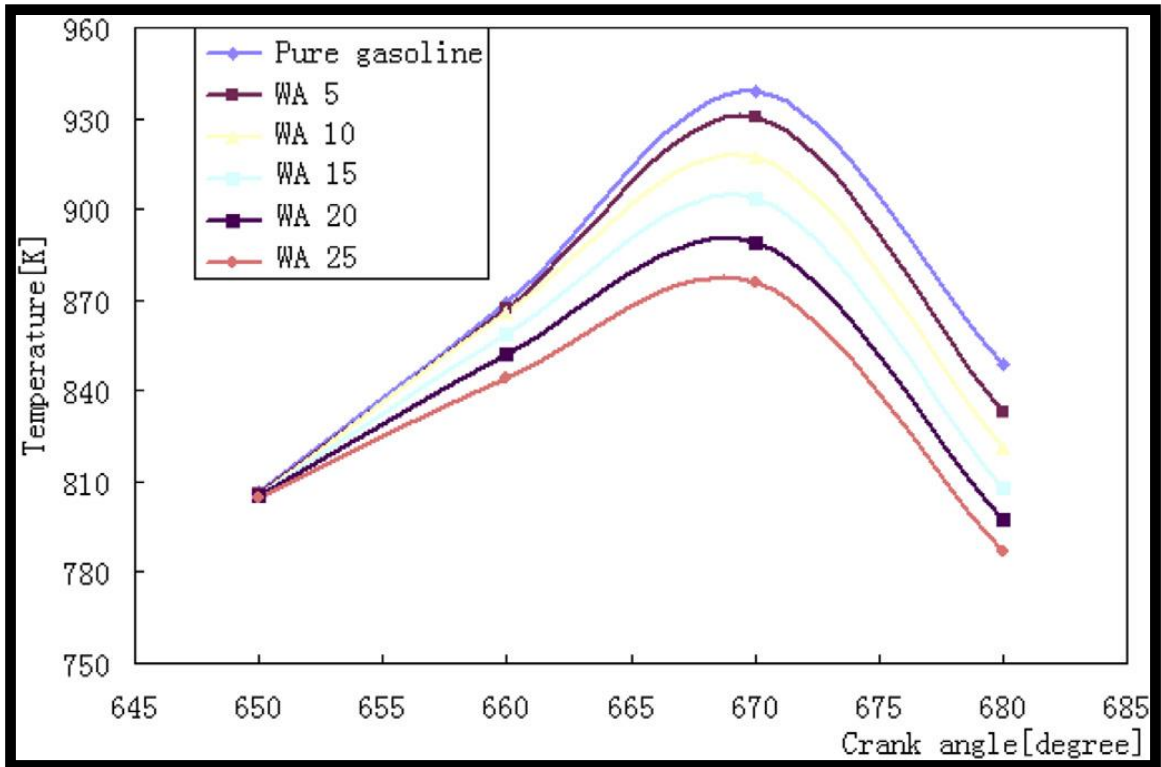


Ilustración 35: Temperatura generada con el sistema de EGR. Fuente: [22]

### 5.2.7. Inyección de agua directa en el conducto de escape:

En el caso de que intentemos inyectar agua en el conducto de los gases de escape, tenemos que guiarnos por los estudios realizados por “Nour”, donde se basa en un motor muy característico, el motor “MEC”, teniendo en cuenta las siguientes características correspondientes:

Motor:	Motor Diesel DI monocilíndrico de 4 tiempos
Diámetro del cilindro (mm):	89 mm
Carrera (mm):	100 mm
Relación de compresión (CR):	622 m <sup>3</sup>
Velocidad del motor (ES) (rpm):	15
Forma del cilindro:	Tipo reentrante
Inyección:	Sistema de inyección Common Rail
Medidas de inyección:	φ 0.158 mm x 8
Sistema de admisión:	Sobrealimentación
Tren de válvulas:	2 admisión y 1 escape
Velocidad del motor (rpm):	1000 rpm

Cantidad de inyección de combustible (MG/Cycle):	32
Sincronización de la inyección de combustible (ATDC):	- 6
Sincronización de la inyección de agua (0-720 DEG):	350°, 400°
Cantidad de inyección de agua (MG-Cycle):	6, 12, 24 y 40
Temperatura de aire de admisión:	65°C
Temperatura de refrigerante:	85°C
Temperatura de aceite:	70°C
Elevación de la válvula de admisión, IVO, IVC:	8 mm, 14° BTDC, 30° ABDC
Elevación de la válvula de escape, EVO, EVC:	8 mm, 39° BBDC, 5° ATDC
Elevación de la válvula de escape (mm) y relación de EGR (%):	3 mm (10% EGR) y 4 mm (25% EGR)
Relación de equivalencia para la combustión Diesel convencional:	0.72

**Tabla 4:** Características de motor. Fuente: Trabajo de campo.

En este estudio en el que se inyecta agua, hay que tener en cuentas las tres variables más importantes que son:

- Momento en el que se comienza la inyección.
- Proporción de agua inyectada.
- Porcentaje del sistema de EGR.

La finalidad de este sistema es introducir de nuevo la energía en el interior de los gases de escape. Aún no se logra convertir en energía productiva debido a que una parte de los gases generados en la combustión aún se pueden emplear en la próxima combustión, de tal manera que se vuelven a introducir en el interior del cilindro y así éstos no son expulsados al exterior y son aprovechados, generando un trabajo positivo.

Si tuviéramos una inyección más temprana o tardía nos generaría unas consecuencias como es la generación de presiones máximas semejantes. De todas formas, cuanto más grande es el valor del porcentaje de la recirculación, más grande es el porcentaje de la cantidad de EGR que se genera, la presión máxima es menor y los

valores que se obtienen en el momento en el que el pistón llega a la parte alta o "PMS" son mucho menores. Los valores de los gases producidos son muy elevados, refiriéndose con estos valores a la entalpía y al salto entálpico, siendo éste durante el ciclo menor. Si se tiene en cuenta el valor de la presión máxima en el cilindro siempre será mucho menor que si no se usa este método de EGR, en cambio siempre será mayor si sólo se emplea el sistema de EGR, ya que se aprovecha la parte positiva de la energía evaporada para disminuir de manera considerable el estado térmico de los respectivos gases que se ponen a recircular. En lo que se refiere a las emisiones de  $\text{NO}_x$ , éstas disminuyen de manera considerable a medida que se vayan inyectando gases de EGR, pero, por el contrario, sabemos que las cenizas y el CO van aumentando de manera proporcional a medida que disminuye el  $\text{NO}_x$ , llegando a la conclusión de que este estudio no es muy empleado. Se puede ver claramente en las siguientes gráficas que se muestran a modo de ejemplo:

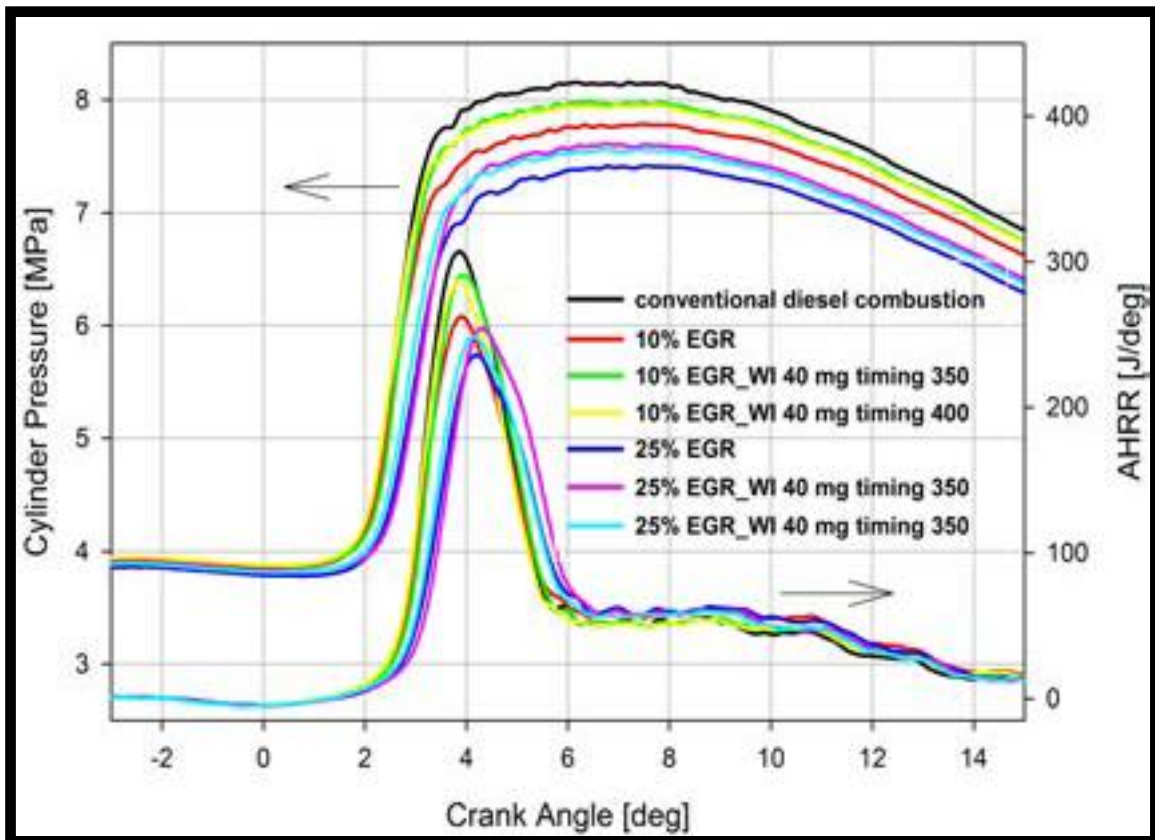


Ilustración 36: Presión en el interior del cilindro con el uso de cantidades de EGR determinadas. Fuente: [17]

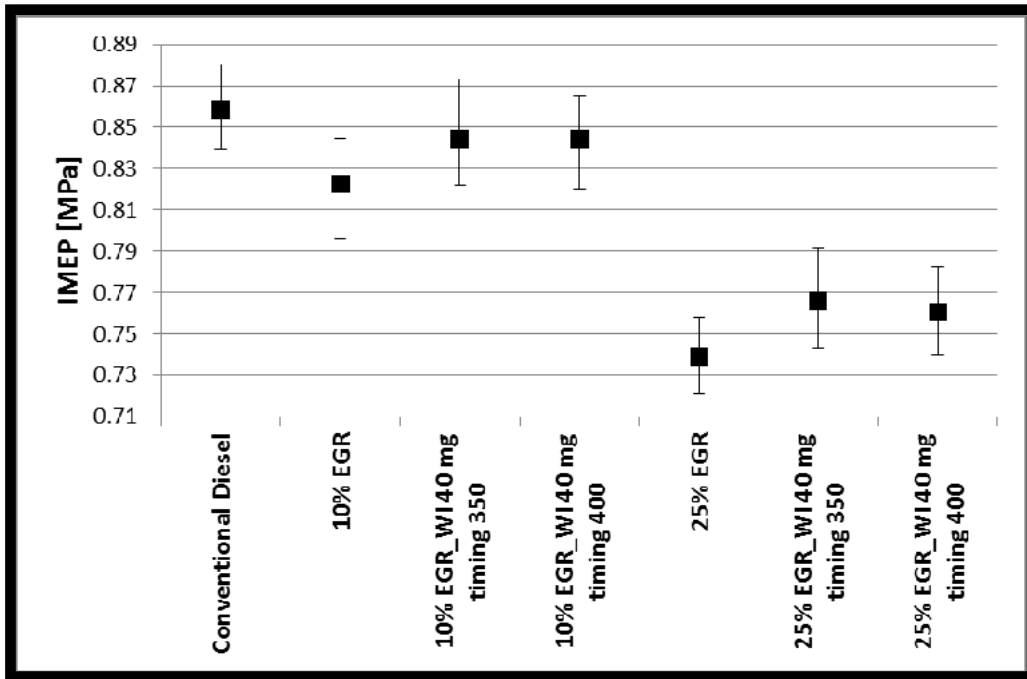


Ilustración 37: Cantidad de IMEP según el sistema usado. Fuente: [17]

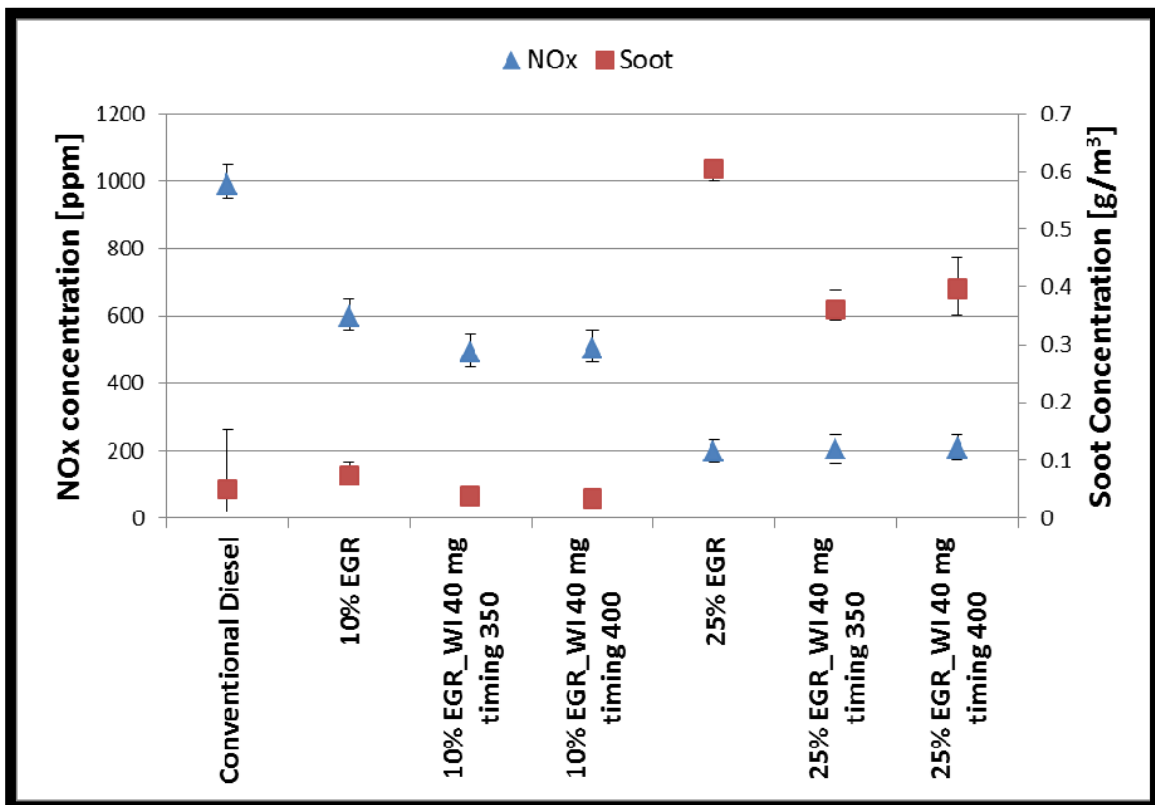


Ilustración 38: Concentración de emisiones de NO<sub>x</sub> según el sistema usado. Fuente: [17]

### 5.3. Atomización de la gota con una representación gráfica:

Si deseamos inyectar agua y llevar a cabo su mezcla de manera correcta con una determinada cantidad de aire aspirada por el propio motor, hay que saber que el único elemento importante que nos queda que influya en la atomización de la gota es el combustible, además de afectar en la generación de dicha gota atomizada. Como dijimos con anterioridad, afecta demasiado el punto en el que se inyecta el agua, debido a que las condiciones en las que se lleva a cabo la gota no son siempre las mismas pues, esta gota puede variar considerablemente. En lo referido a lo grande o pequeña que sea la gota que se desea lograr se realiza un pequeño estudio adimensional por medio gráfico. Una de las fórmulas empleadas para dicho análisis es la siguiente, por medio del empleo de números adimensionales:

$$R_e = \frac{\rho * v * d}{\mu}$$

$$W_e = \frac{\rho * v^2 * d}{\mu}$$

$$Oh = \frac{\sqrt{W_e}}{R_e}$$

Los valores tomados para llevar a cabo los respectivos cálculos no pueden ser variados de tal manera que son prefijados. Estos valores se muestran en la tabla 3:

Propiedad	Combustible-octano	Agua
Densidad (25°) (kg/m <sup>3</sup> )	691	998
Viscosidad (25°C) (mPa s)	0,47	0,9
Tensión superficial (25°C) (mN/m)	18,3	72,7
Presión de vaporización (20°C) (kPa)	5,2	2,32

Tabla 5: Valores de cálculos de la gota. Fuente: Trabajo de campo.

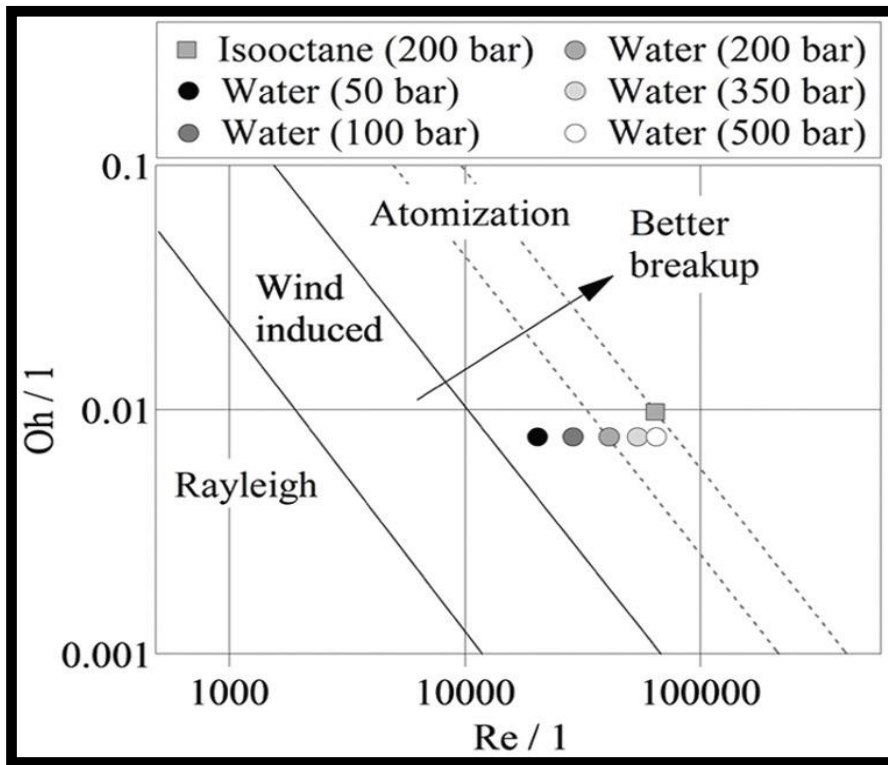


Ilustración 39: Relación de compresión en función de la cantidad de agua o combustible inyectado. Fuente: [23]

La similitud de la gota de agua y combustible se puede ver claramente en la representación gráfica mostrada anteriormente. Estos valores son obtenidos dado que los números son adimensionales y muy semejantes unos de los otros. Debido a la compensación de la viscosidad del agua y la densidad de la misma, se obtienen por medio de un factor de dos números, pero uno de los valores que compensa es su tensión superficial que se obtiene con un factor de 4 en comparación con la del combustible que es ISO-OCTANO. Si llevamos a cabo la combinación de ambos nos da el valor adimensional de  $Oh$ , que implica que la energía de atomización del agua es muy semejante en ambos casos y se desarrolla de una manera más amplia dado que estamos tratando con otro suplemento que, en este caso, es el agua. Para llevar a cabo mejoras se propone una mejora de la atomización de la gota de agua en dos procesos muy diferentes, cuyos procesos pueden ser:

- ⇒ Afinamiento de la propia gota.
- ⇒ Fractura de la gota.

En el caso de que estuviéramos hablando de una gota muy grande puede generar varios factores contrarios como es la poca homogeneidad y la poca eficiencia en el proceso de la combustión.

Si el tamaño de la gota fuera muy pequeña puede producir un aumento de la cantidad de inquemados y esto es producido porque el agua ocupa una gran parte de los inquemados debido a que el agua ocupa una gran superficie eliminando gran cantidad de calor y retrasando dicha combustión del combustible. Un tamaño óptimo de la atomización de la gota es algo muy complejo para llevar a cabo su cálculo, de tal forma que se intentará estimar de la manera más parecida el tamaño de dicha gota. Es por esto por lo que es necesario tener en cuenta el tamaño de dicha gota que se obtiene de dicha inyección y hacer que la gota sea lo más parecida a las partículas que se usan durante el sistema. Si conseguimos que la gota sea la medida exacta nos permite una simplificación y veremos que el agua se comporta de la misma manera que el combustible, como se ve en la siguiente gráfica:

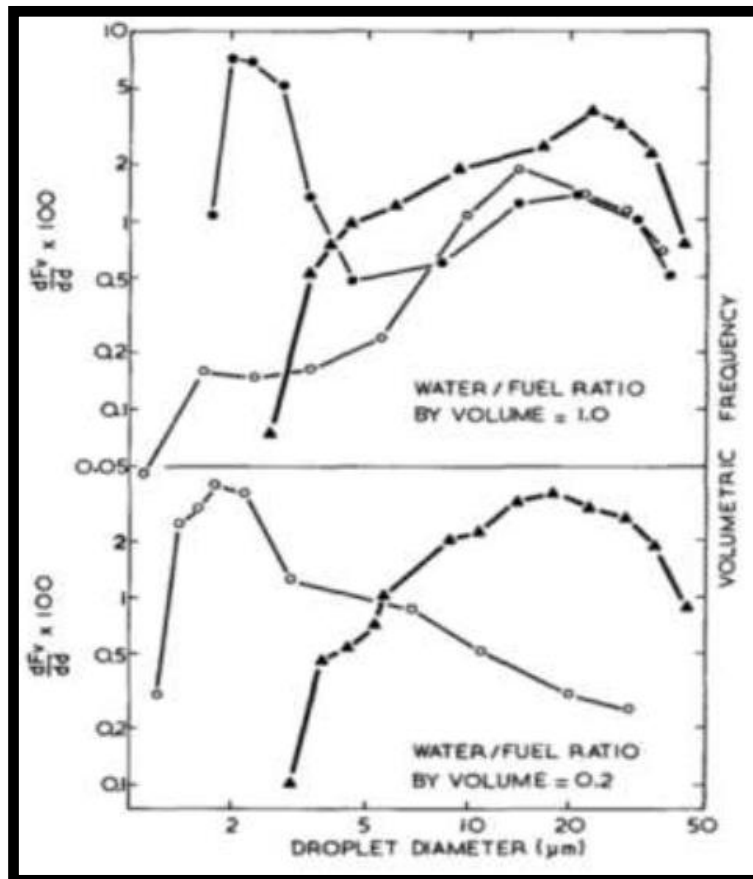


Ilustración 40: Representación en función del sistema de inyección de agua. Fuente: [24]

Teniendo en cuenta las gráficas representan las siguientes características:

- Las líneas junto con los círculos nos muestran la inyección con mezcla de agua.



- Las líneas con los cuadros nos dan la representación de inyección en la aspiración.
- La única línea que nos queda es inyección en la cámara de combustión.

En la siguiente imagen se ve de forma gráfica por medio de un programa que nos muestra, lo más real posible, la forma de la gota:

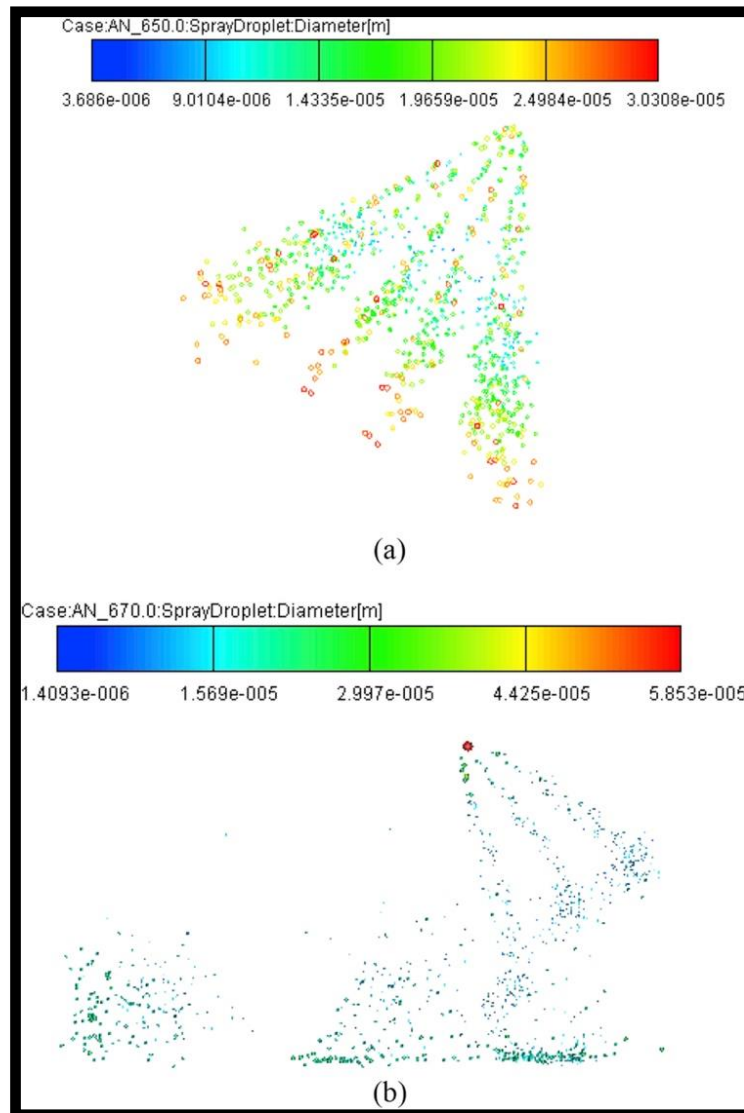


Ilustración 41: Representación real de la forma de la gota. Fuente: [22]

#### 5.4. Ventajas y desventajas que tiene el empleo de la inyección de agua:

Si pensamos en los estudios que se han explicado con anterioridad se ve que el uso del agua como mezcla con el combustible es muy poco usual, su uso debido a que

en bajas revoluciones hace que el motor sea muy poco estable, una gran diferencia con respecto a tener el motor en plena carga. Veremos a continuación algunas soluciones:

- ⇒ Para evitar estas caídas del motor a bajas revoluciones se intenta generar una relación de compresión en la que sus puntos sean variables, estos motores con dicha relación de compresión se consiguen gracias al uso de un árbol de levas tipo Miller como vemos en la ilustración 22:



**Ilustración 42:** Árbol de levas tipo Miller. Fuente: Trabajo de campo.

- ⇒ Es un motor muy problemático para condiciones de temperaturas bajo cero, aunque como solución se puede emplear para disolverlo en alcohol y de esta forma disminuir su punto de congelación.
- ⇒ Parte del agua que se inyecta en el interior del cilindro se pega a las paredes de la camisa y se va deslizando de manera que va bajando y se deposita en el aceite del cárter del motor. Si llevamos a cabo un estudio de la composición del aceite después de trabajar el motor alrededor de unas 60 horas, vemos como en el interior del aceite hay restos de agua, debido a que los segmentos no son totalmente estancos.
- ⇒ Existe una gran problemática con la corrosión debido al empleo del agua y el tipo de materiales debido a su resistencia, ya que se emplean relaciones de compresión demasiado elevadas.
- ⇒ Es necesario la colocación de un depósito de agua a parte del de combustible y rellenar dicho depósito, lo que limita la autonomía del vehículo.
- ⇒ Una ventaja es que se suele gastar 4-5 veces menos la cantidad de agua que la cantidad de combustible.

- ⇒ La gran desventaja es que se necesita de electrónica muy compleja para que el motor funcione de forma correcta.

#### **5.4.1. Resultados de inyectar agua en motor de chispa:**

La gran diferencia que presentan con respecto a los demás estudios y es que es uno de los más usados, de hecho, se puede ver en el estudio que he realizado, es la relación agua/combustible, aparte de que también se tiene en cuenta el rendimiento y la cantidad de emisiones. El combustible en este motor es inyectado en el interior del cilindro y el agua se hace penetrar por medio de un inyector en el interior de la admisión empleando diferentes inyectores de caudales diferentes como es el caso del estudio del Renault 5 GT Turbo, donde la prueba se lleva a cabo con inyectores de diferentes caudales. Los parámetros que se han calculado para este motor de 4 cilindros son:

- ⇒ Presión.
- ⇒ Temperatura del cilindro.
- ⇒ Par de frenado.
- ⇒ Potencia de frenado.
- ⇒ Presión media efectiva.
- ⇒ Eficiencia térmica.
- ⇒ Emisiones de CO.
- ⇒ Cantidad de R "Hidrocarburos".
- ⇒ Cantidad de NO<sub>x</sub>.

Los resultados obtenidos por medio de estos cálculos demuestran que el aumento de la tasa de flujo de agua nos da como resultado un aumento del rendimiento y una reducción de las respectivas emisiones que genera el motor, teniendo una gran diferencia con las emisiones que genera el motor con gasolina plenamente pura. Según este estudio realizado, se demuestra que hay un aumento excesivo de agua en la cámara de combustión y el rendimiento producido ha disminuido y por lo tanto tenemos una eficiencia muy pequeña durante la combustión.

#### **5.4.2. Campo de aplicación de la inyección de agua:**

Al principio de este trabajo de fin de grado, se puede ver claramente que se hace referencia a la Segunda Guerra Mundial debido a que este sistema de inyección de agua se consideraba como una especie de subsistema de los respectivos motores. Para el empleo de éste sistema en los diferentes reactores que empleaban como combustible

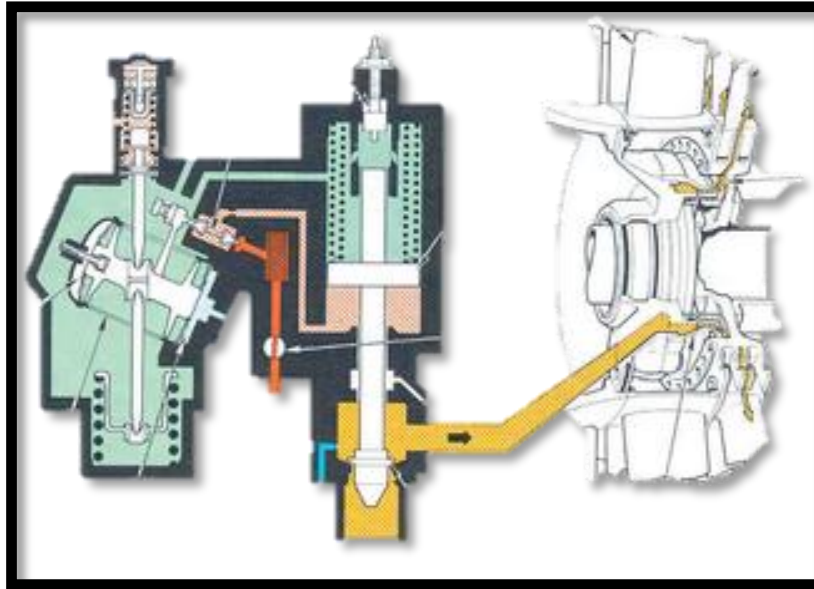
el gas y para los diferentes motores alternativos usados en la aviación, en ningún momento en aquella época se pensó que resultaría eficiente el uso de sistemas de inyección de agua para bajas potencias como es el caso de los motores de vehículos y mucho más cuando una marca muy poco conocida, como es Saab pero que es muy usada en otros países, tenía propósito colocar un intercooler como un nuevo elemento de la sobrealimentación. De todas maneras, en la actualidad hay leyes anticontaminación que obligan a disminuir la cantidad de  $\text{NO}_x$  y la cantidad de CO en los respectivos gases de escape, además de que los fabricantes de motores quieren producir motores mucho más eficientes, de tal forma que se ve como algo muy positivo la aplicación del agua como un nuevo sistema de inyección. Este sistema produce como beneficios:

- ⇒ Aumento de potencia.
- ⇒ Reducción de emisiones.

Un gran ejemplo es la innovación de la marca alemana BMW, que presenta un nuevo modelo que es el M4 GTS, donde su motor está compuesto de un sistema muy innovador que incluye la penetración de agua en el sistema de sobrealimentación. Este motor cuenta con el nuevo sistema de BOSCH llamado "Water-Boost" donde dicho motor da solución a muchos problemas de otras marcas de la automoción, en el que se establece un 5% en la mayoría de las prestaciones, se reduce la cantidad de  $\text{CO}_2$  en un 4% y la disminución del consumo de combustible en un 13%. Si nos vamos al ámbito de la competición, no se sabe del uso de este método, pero sí que se emplea en motores de coches como es el Ford Escort Costworth. Tenemos muchas cosas más que desconocemos en el mundo de la competición y éste es el caso se trata de las motos. Honda se propone la fabricación de una moto cuyo motor se componía de un medio para inyectar agua pero que nunca se puso en venta debido a que fue prohibido para el uso de competición por la Federación "FIA", pero otras de las marcas japonesas que no se quedó atrás fue Mitsubishi, que fabricó un medio por el cual se inyectaba agua de manera experimental, y que no se instaló en ninguno de los motores de sus vehículos que salieron a la venta.

La inyección de agua se emplea también en los reactores. La potencia máxima engendrada por estos reactores depende de un factor y es la densidad o incluso el peso del flujo de los gases generados por el propio motor. En caso de que la presión atmosférica se reduzca o aumente la temperatura ambiente del aire, tenemos que tener presente que hay una gran pérdida de empuje. Por el contrario, para llevar a cabo un aumento de la potencia de salida se hace circular agua refrigerante para generar un enfriamiento en el flujo de aire.

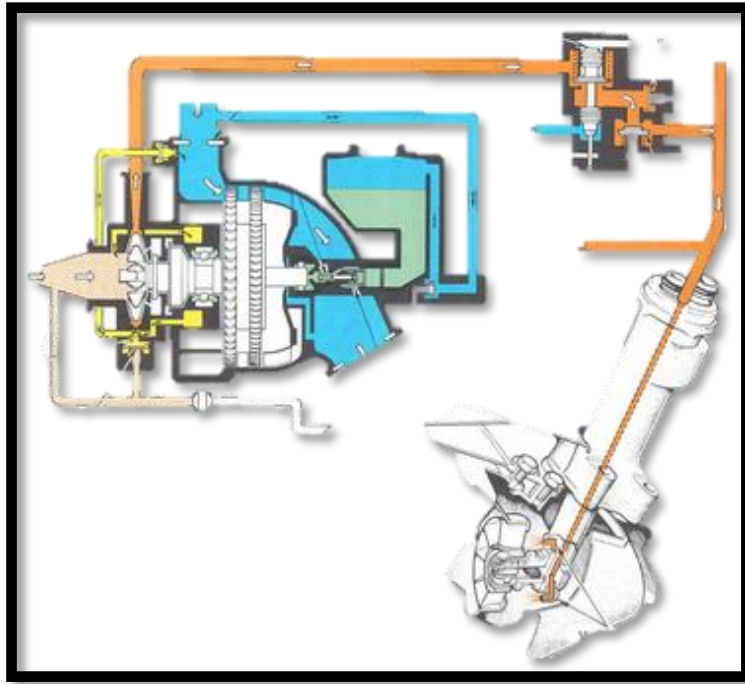
Hay dos métodos principales para inyectar la refrigeración en el flujo de aire. Hay motores que cogen y rocían el refrigerante en la entrada del compresor, siendo el método más empleado la inyección en la cámara de combustión. Por lo tanto, gracias a esto, se puede obtener una distribución mucho más uniforme y la cantidad de refrigerante que se puede inyectar es mucho mayor.



**Ilustración 43:** Sistema de inyección de agua en los reactores. Fuente: Trabajo de campo.

Para llevar a cabo una reducción de la temperatura del aire se rocía la mezcla agua/refrigerante en la succión del compresor. De esta manera logramos un aumento de la densidad a la entrada del compresor y, en consecuencia, un aumento del empuje. El sistema que se muestra a continuación se trata de un sistema de inyección de entrada de un compresor típico. Cuando éste se enciende, el refrigerante se bombea a una unidad de control a parte cuya función es la medición del flujo de dicha mezcla en la misma entrada del compresor. Otro de los elementos por los que está compuesto es una servoválvula que regula la cantidad de aceite utilizando aceite del propio motor como medio de funcionamiento. Esta servoválvula es muy sensible a tres factores:

- ⇒ Presión del aceite.
- ⇒ El giro del eje de la hélice.
- ⇒ La presión del aire atmosférico.



**Ilustración 44:** *Inyección de agua en la succión de un compresor convencional. Fuente: Trabajo de campo.*

Como se puede ver en la imagen, en un dibujo no se puede apreciar, pero durante los estudios se ve que dicha refrigeración en la entrada de la cámara genera un gran aumento del caudal másico por medio de la turbina. En cambio, la caída de presión y la temperatura de funcionamiento generada en la turbina produce un gran aumento de la presión de la tubería del suministro de dicho chorro, lo que genera un empuje mucho mayor. Esta reducción produce algo bastante positivo y es que permite inyectar mayor cantidad de combustible y se aumenta el flujo de manera considerable, aumentando la velocidad de giro del motor, lo que facilita dicho empuje.

Este sistema que se muestra en la imagen anterior es un sistema muy típico de inyección en la cámara de combustión o más común directamente en el cilindro. El refrigerante es enviado a una bomba de la turbina que es movida por medio del aire y luego circula hasta una unidad que detecta la cantidad de agua. Desde ese punto se hace pasar por medio de cada boquilla de rociado de combustible y se rocía sobre las paletas del remolino del tubo de llama, de tal manera que genera el enfriamiento del aire que se conduce por dicho conducto hasta la zona de combustión. El sistema de control de la cantidad de combustible detecta la cantidad o presión de agua y éste restablece de manera automática el controlador de la velocidad de este motor para suministrar una velocidad mucho mayor en el motor, obteniendo dicha velocidad el nombre de velocidad máxima. El control de la cantidad de flujo de agua solo se abre en caso de que la

diferencia entre la presión de aire que sea entregada por el compresor y determine que la presión del agua sea correcta.

## **5.5. Despiece de motor “C1J”: Aplicación de la inyección de agua**

Hemos realizado un despiece parte a parte del motor “C1J” para llevar a cabo el estudio del sistema de inyección de agua y, en el apartado posterior, veremos algunas mediciones como gases de escape y avances de encendido para lograr un mapa electrónico correcto para el funcionamiento del “C1J” con combustible y otro para la inyección de agua:

### **5.5.1. Bloque de motor del “C1J”:**

El bloque de motor del “C1J” es el elemento más importante y principal que está hecho de hierro nodulado y directamente generado como una pieza, siendo este material del que está fabricado el bloque resistente a las altas temperaturas. Este bloque de motor tiene un gran privilegio y es que los cilindros van dentro de camisas postizas, en caso de que el motor arrastre una de las camisas no tendremos que rebajar dicha camisa, sino que la podemos extraer y colocar una nueva. En estos orificios de las camisas es donde el pistón lleva a cabo el recorrido de subida y bajada. Dicho bloque tiene unas perforaciones roscadas para colocar los espárragos que sujetan la culata de aleación ligera que entre dicha culata y bloque se coloca una junta para evitar fugas entre los mismos. También existen otros tipos de orificios en el bloque como son los circuitos de lubricación y refrigeración. A continuación, mostraremos una imagen del bloque de motor del “C1J”:



**Ilustración 45:** *Bloque de motor de “C1J”. Fuente: Trabajo de campo.*



### **5.5.2. Junta de culata del “C1J”:**

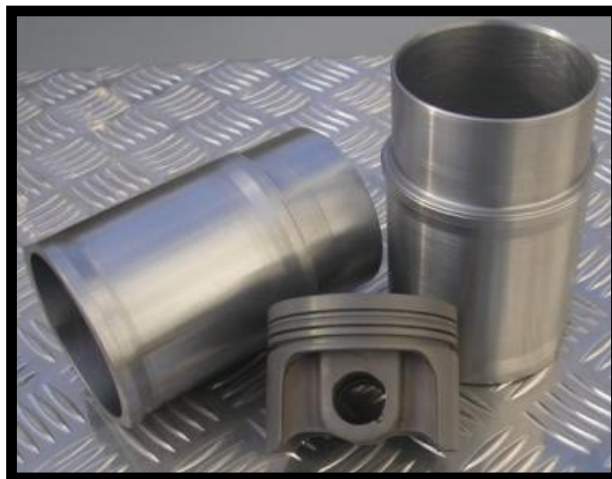
La función de la junta de culata es sellar el pliegue entre el bloque y la misma. La composición de la junta puede ser de acero o compuesta de varios materiales como puede ser latón, caucho y bronce. Esta junta debe tener la misma forma y orificios que el bloque, para canalizar todos los orificios desde el bloque hacia la culata, como pueden ser los pasos de aceite, de refrigerante, etc. A continuación, vemos una junta de culata de un “C1J”:



*Ilustración 46: Junta de culata del “C1J”. Fuente: Trabajo de campo.*

### **5.5.3. Camisas de cilindro del motor “C1J”:**

Estamos ante un motor encamisado, por lo tanto, la función de esta camisa es permitir el movimiento del pistón de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo. Para ello tiene que tener unas características determinadas: se fabrican por medio de fundición centrífuga, se compone de un aro en la parte alta para impedir que la camisa se deforme debido a las presiones generadas en el interior del cilindro y las fuerzas pretensoras. Vemos la forma de las camisas del “C1J”:



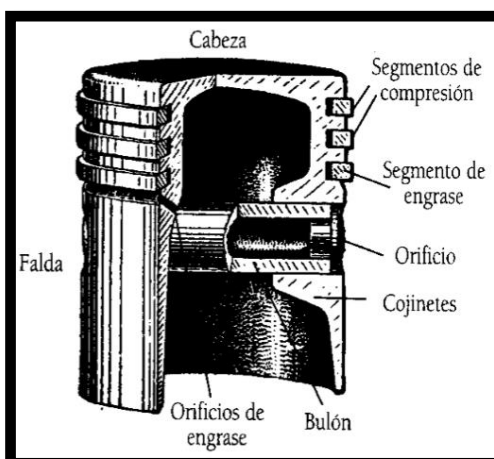


**Ilustración 47:** Camisa de cilindro de "C1J". Fuente: Trabajo de campo.

El interior de la camisa por donde deslizan los aros del pistón está fabricado de hierro especial gris y fundido que soporta el desgaste y es bastante resistente. Algunas camisas suelen venir bañadas con una aleación de cromo para que tengan una mayor resistencia al desgaste. Con la colocación de camisas se consiguen varios beneficios, entre los cuales encontramos que el bloque esté más separado del calor y que se pueden emplear otros materiales de fabricación como puede ser el aluminio.

#### **5.5.4. Pistón del "C1J":**

El pistón tiene un diseño bastante complejo que se puede ver claramente en la imagen anterior al lado de las camisas, pero más adelante veremos algunas de sus partes, cada una de ellas con un significado. En este caso la falda está fabricada de fundición nodular y además está compuesto de una corona de acero. En el caso de los pistones del motor "Cleón-Fonte", se lubrica dicha falda del pistón por medio de la lubricación que se inyecta en la camisa del cilindro en cualesquiera revoluciones que se encuentre el motor. Dicho aceite es conducido por medio de unos orificios creados en el interior de la biela hasta llegar a los puntos de refrigeración del pistón. Si tenemos en cuenta la refrigeración del pistón podemos decir que el efecto se llama coctelera y que actualmente sigue usándose este rudimentario método en motores de pequeñas dimensiones, veremos en la siguiente imagen de los pistones del motor "Cleón-Fonte" y las partes de las que se compone un pistón.



**Ilustración 48:** Partes de un pistón". Fuente: [25]



**Ilustración 49:** Pistones del "C1J". Fuente: Trabajo de campo.

### **5.5.5. Anillos o aros del pistón:**

El aro o anillo del pistón tiene como finalidad crear un sellado y reducir la fricción entre el cilindro y el pistón. Lo que se evita con la colocación de los aros es que la mezcla aire/combustible escape a otro lugar como puede ser el cárter del motor. Estos aros o anillos se componen de un pequeño corte que permite dilatación o deslizamiento sobre el extremo del pistón.

El número de aros y el tamaño se decide según la capacidad que tenga el motor. En el caso del motor que estamos tratando el pistón cuenta con tres aros, dado que se trata de un motor de 4T, compuesto de manera ordenada desde la cabeza hacia la falda como:

- Aro de fuego.
- Aro de arrastre.
- Aro de engrase.

El aro de engrase se emplea para eliminar el aceite lubricante que se queda en las paredes de los cilindros una vez se ha realizado el engrase por medio de los orificios del mismo. Un punto positivo es que el aro evita excesos de aceite y además que dicho aceite se mezcle con la mezcla aire/combustible, produciendo una mezcla incorrecta.

Las principales funciones de los aros son:

- ⇒ Sellado.
- ⇒ Reducción del consumo de aceite.
- ⇒ Comunicación de temperatura.
- ⇒ Evitar contacto entre el pistón y la camisa del cilindro.

Estos segmentos o aros deben de ir flotando de manera libre en el interior del pistón dado que dispone de unas guías para evitar que se escapen y, de esta manera, estar en contacto con el cilindro y que cada uno de los aros pueda realizar sus funciones determinadas. La fabricación de estos aros se realiza con hierro fundido muy duro y además son muy quebradizos, hay aros también fabricados de una aleación de acero empleada para la fabricación de muelles. Seguidamente, vemos la imagen de los tres aros de los que se compone el pistón del "C1J":



Ilustración 49: Anillos o aros del "C1J". Fuente: Trabajo de campo.

### **5.5.6. Bulón del pistón en el motor "C1J":**

El pasador del pistón, pasador de muñeca o bulón permite la conexión entre el pistón y la biela. La función es sujetar el esfuerzo producido entre las cargas de corte y flexión. Este bulón tiene que ser resistente a las elevadas temperaturas que alcanza el motor, la forma del bulón es tubular, proporciona gran resistencia y su peso es muy mínimo.

La fabricación de los bulones suele ser de un acero cementado con contenido en carbono reducido. Dicha composición es la siguiente:

- 0.15% Carbono.
- 0.3% Silicio.
- 0.55% Manganeso.
- 99% Hierro.



Ilustración 50: Bulón de pistón del "C1J". Fuente: Trabajo de campo.

### **5.5.7. Biela del “C1J”:**

La biela como el propio nombre indica, conecta el pistón al cigüeñal para que se lleve a cabo el movimiento que genera potencia. La conversión de giro generado por la biela es de movimiento alternativo producido por el pistón transmitido al cigüeñal que genera un movimiento giratorio. La cabeza de la biela está cogida al cigüeñal, mientras que el pie de biela está solidaria al pistón por medio del bulón. En la mayoría de estos casos, la biela es hueca o está provista de un conducto de aceite fundido interno para llevar la lubricación al bulón. Según los requisitos, la biela está hecha de aluminio de alta calidad, de aceros microaleados. Para el caso del motor “C1J”, para uso de competición, se suele realizar de titanio, más conocido como biela forjada, las cuales tienen algo muy positivo y es que soportan mayor la relación resistencia/peso, pero si queremos algo de menos costo y que soporte bien la relación resistencia/peso para un uso diario y no de competición, se emplean bielas sinterizadas. Vemos a continuación, dos tipos de bielas (una completa y otra partida) y sus respectivas partes:

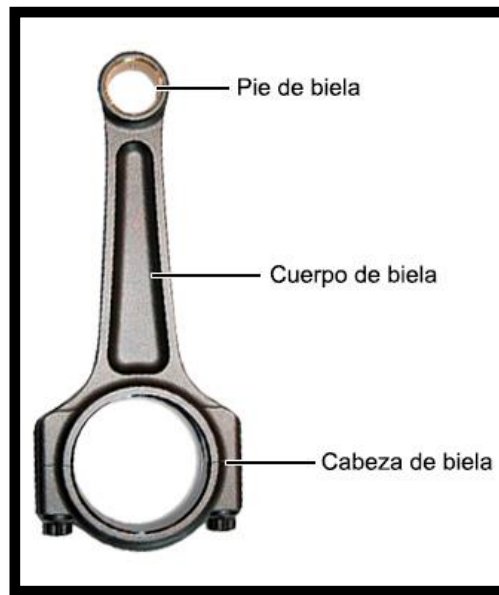


Ilustración 51: Biela del motor “C1J”. Fuente: [26]

### **5.5.8. Culata del “C1J”:**

En el motor “C1J” la función principal de la culata es hacer un espacio vacío entre el bloque de motor y los cilindros desde su parte alta y esta estanqueidad se logra gracias a una junta. Por lo tanto, para permitir la entrada de una nueva cantidad de mezcla dentro del espacio entre la culata y el cilindro, tanto la válvula de escape como la de admisión están montadas en la culata. La función de una y otra son muy diferentes,

en el caso de la de admisión permite el paso de la mezcla aire/combustible y la de escape permite que los gases de escape quemados salgan al exterior.

Para lograr la explosión de la mezcla aire/combustible se monta una bujía que genera una chispa, haciendo la función de llama. La culata tiene sus respectivos conductos de admisión a donde se conecta el carburador y los respectivos conductos por donde salen los gases de escape al exterior.

Una culata generalmente se fabrica mediante un proceso de fabricación por medio de fundición o forja mediante una pieza única. Antiguamente se fabricaban las culatas de fundición, pero en la actualidad la mayoría de las culatas son fabricadas de aluminio como es el caso de la culata del "C1J".

La culata está equipada con los siguientes elementos:

- Conjunto de válvulas de admisión y de escape.
- Inyector de combustible en este caso para este motor se compone de un carburador weber común para los 4 cilindros.
- Conjunto de balancines.
- Guías de válvulas.
- Muelles de válvulas.
- Cazoletas de válvulas.
- Cuñas de cierre o grupillas de válvulas.
- Bujías.

En el caso del motor que estamos tratando, aunque se trate de un coche de competición, debido a la edad del vehículo no cuenta con mucho material de competición y por ello el motor está totalmente de serie y su caballaje se obtiene gracias a la inyección de agua y dándole un poco más de presión al soplado de la sobrealimentación. Veremos más adelante en las pruebas de banco que, siendo el coche de serie, su Turbo está soplando a una presión de 1.6 bares y con la inyección de agua se puede poner a soplar a 2 bares de presión. Vemos los diferentes componentes de una culata en la imagen siguiente:

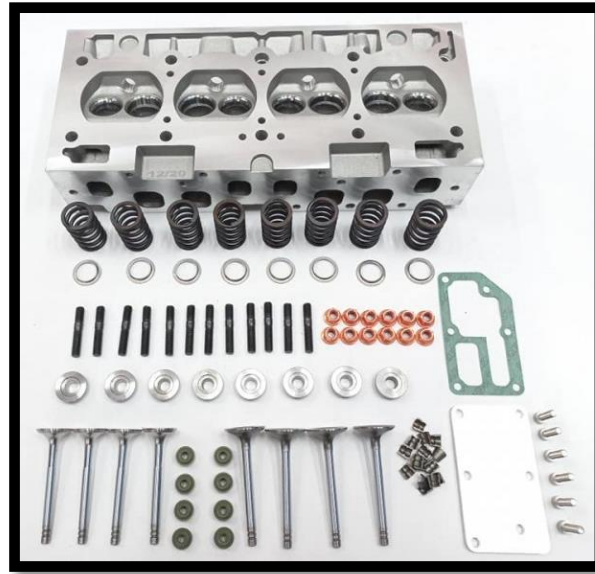


Ilustración 52: Culata de "C1J". Fuente: Trabajo de campo.

### **5.5.9. Cámara de combustión del motor "C1J":**

Si tratamos la cámara de combustión, ésta es un espacio hueco que se encuentra entre la culata y el cilindro donde se lleva a cabo el proceso de la combustión de la mezcla. En esta cámara de combustión se encuentran solidarias a la culata las válvulas de admisión y de escape. Las temperaturas alcanzadas en dicha cámara son bastantes elevadas y, como se dijo con anterioridad, tanto la culata como el bloque están compuestos de materiales capaces de soportar estas temperaturas. El volumen que se mantiene en la cámara de combustión está bien determinado debido a la existencia de una determinada relación de compresión, siendo esta relación medida como la relación entre el volumen del cilindro y el volumen entre el cilindro y la culata.



Ilustración 53: Cámara de combustión de "C1J". Fuente: Trabajo de campo.

### **5.5.10. Cuchara de admisión/escape de motor "C1J":**

El motor "C1J" emplea una válvula de admisión y otra de escape por cada cilindro, en total el motor cuenta con dos válvulas por cilindro. La válvula de admisión está colocada en la culata y su principal cometido es canalizar la mezcla de aire/combustible al interior de la cámara de combustión.

También se monta la válvula de escape en la culata para canalizar los gases generados durante la combustión para que salgan al exterior. El motor “C1J” está compuesto por un total de 8 válvulas, una válvula de admisión y una de escape por cada cilindro.

El movimiento de las válvulas tanto de admisión como de escape es generado por medio del movimiento del árbol de levas. El eje de camones emplea excéntricas, unas varillas empujadoras y balancines para llevar a cabo el movimiento de las válvulas. Para un adecuado funcionamiento se requiere de una sincronización adecuada tanto de la apertura como cierre de las válvulas para que funcione sin ningún tipo de problema.

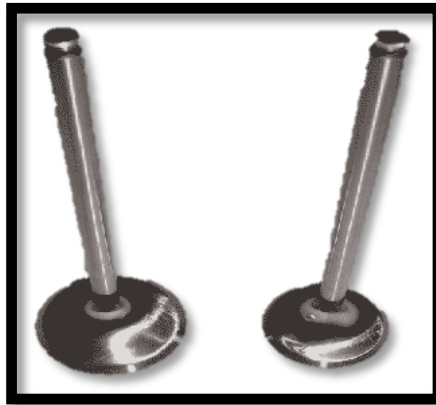


Ilustración 54: Válvulas del “C1J”. Fuente: Trabajo de campo.

### 5.5.11. Árbol de levas de motor “C1J”:

La función principal de un árbol de levas o un eje de camones es producir la apertura y cierre tanto de las válvulas de admisión/escape en el momento adecuado. El regulador de la apertura en el momento exacto u oportuno se lleva a cabo por medio de excéntricas o leva, la forma de estas levas es como de medias lunas y su movimiento es transmitido de manera directa a la válvula o por medio de un eje de balancines y unas varillas empujadoras.

El giro generado por el movimiento del cigüeñal es transmitido por medio de engranajes o cadena para hacer girar el eje de camones y de esta manera se genera movimiento en la válvula de admisión y la de escape, aunque se pone en funcionamiento otros elementos como son centradores o seguidores de leva, varillas empujadoras y los balancines.

El diseñado de las levas influye mucho en el rendimiento que puede generar un motor. La fabricación de los árboles de levas se puede realizar con diferentes materiales como puede ser lo más habitual de hierro enfriado dado que su resistencia es mucho



mayor porque el material se somete a un enfriamiento que lo hace mucho más resistente. En caso de que se quiera fabricar un árbol de levas para uso de competición se suele hacer de acero billet, como es el caso del motor por el cual se realiza el estudio de la inyección de agua cuyo motor está forjado completamente.

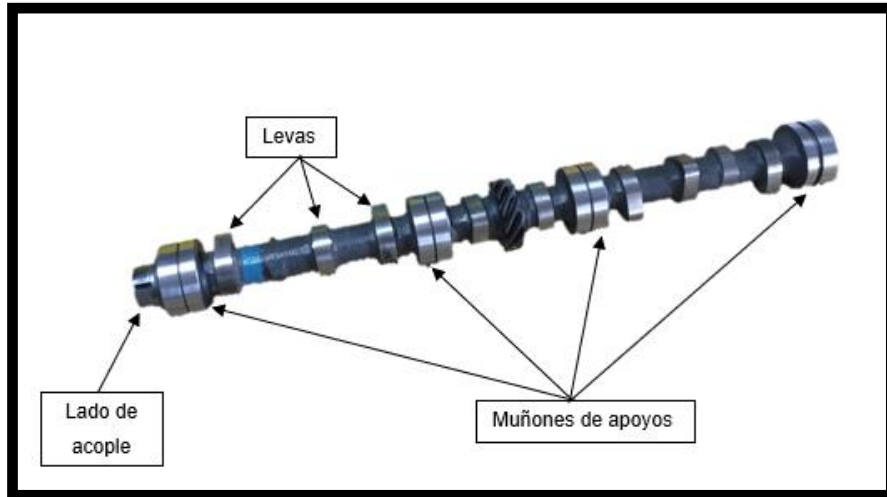


Ilustración 55: Árbol de levas de "C1J". Fuente: Trabajo de campo.

### 5.5.12. Cárter del motor "C1J":

El cárter del motor "Cléon-Fonte" o "C1J" es la parte más baja del motor y su función es almacenar el aceite del motor, en su interior tanto en el cigüeñal como en las tapillas. En el interior del cárter se encuentra ubicado la bomba de aceite que se encarga de lubricar todo el motor por medio de sus conductos, también el cárter en su parte inferior dispone de un tapón que nos permite extraer el aceite del motor. El interior del cárter se encuentra tabicado con una serie de aletas que aparte de evitar que el motor se quede sin aceite debido al movimiento también beneficia en la refrigeración del aceite, normalmente la temperatura del aceite oscila entre 80°C y 90°C. El cárter debido a la temperatura que coge por el calentamiento del aceite se construye de materiales muy ligeros como lama fina metálica o incluso aluminio. En el caso del motor "Cléon-Fonte", el cárter es metálico y no cuenta con aletas para el sistema de refrigeración dado que para este tipo de motores se emplea un radiador de aceite exterior colocado en la parte delantera del vehículo para que el mismo movimiento del aire ayude a refrigerar el aceite del motor. En cuanto al tabicado interno del cárter, sí que el motor de prueba para la inyección de agua cuenta con un tabicado riguroso para evitar que en las competiciones el vehículo se quede sin aceite debido a las curvas y baches, como podemos observar en la siguiente imagen:





Ilustración 56: Cárter de "C1J". Fuente: Trabajo de campo.

### 5.5.13. Tapas externas del motor "C1J":

Las tapas externas del motor, algunas de ellas nombradas con anterioridad, como es el cárter, la tapa de la distribución, las tapas del motor "Cléon-Fonte", son de fundición de metal y no suelen ser tapas robustas sino muy finas y ligeras, cuyas tapas son sujetas al bloque de motor por medio de juntas y tornillería, que pueden ser de silicona o incluso papel o corcho. En cambio, el cárter del motor del "C1J" o "Cléon-Fonte", se sella con una junta de corcho, siendo éste último muy usado antiguamente como sellador de las juntas. A continuación, se nombra una de las piezas más importante del motor que permite que el motor respire interiormente y no rompa dichas juntas. Se trata de la válvula de desahogo de gases; en caso de que esta válvula no funcione, rompe las juntas y los respectivos retenes del motor dado que los vapores interiores del motor no salen y buscan cualquier tipo de salida. Se muestra una imagen de dicha válvula:



Ilustración 57: Válvula de desahogo de gases de "C1J". Fuente: [27]

#### 5.5.14. Cigüeñal del motor "C1J":

La función principal del cigüeñal es transformar un movimiento lineal generado por los cilindros en un movimiento de rotación o giratorio. Para tener un uso útil de los movimientos generados por el motor, el movimiento de la biela es transmitido a la muñequilla que va cogida al cigüeñal y dicho movimiento se convierte en movimiento giratorio.

El extremo grande de la biela se atornilla a la muñequilla, pero en cambio la parte pequeña de la biela está solidaria al pistón mediante un pasador que recibe el nombre de bulón. Los contrapesos son colocados de manera muy minuciosa a lo largo del cigüeñal para lograr un correcto equilibrado de las distintas fuerzas generadas por el pistón, de tal manera que se reduce las cargas en los muñones del cigüeñal. El número de muñequillas de biela y también de contrapesos dependen en gran medida de la manera que haya sido diseñado el motor. El cometido del ingeniero encargado del diseño del motor es mantener la longitud lo más baja posible del cigüeñal. Por tanto, entre más bajo más se puede llegar a lograr un equilibrio mucho mayor.

Se intenta colocar una tapilla o sello en el cigüeñal para evitar posibles fugas del sistema de lubricación. El montado del cigüeñal es por medio de cojinetes que hace transmitir el movimiento hasta el volante de inercia. El volante de inercia es un elemento fundido en acero dúctil. En la actualidad, se suelen usar cigüeñales forjados debido a tres factores que son:

- ⇒ Reducción del peso.
- ⇒ Diseño más compacto.

⇒ Mejor amortiguación.

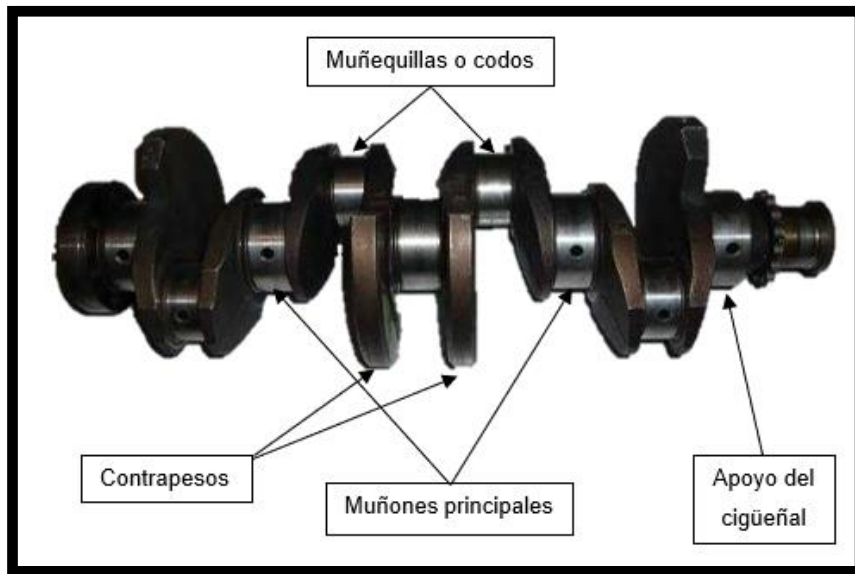


Ilustración 58: Cigüeñal del "C1J". Fuente: Trabajo de campo.

### 5.5.15. Cojinete o tapilla principal del motor "C1J":

Los cojinetes principales o tapillas de bancada se tratan de un anillo partido trimetálico donde la parte superior de la tapilla tiene un pequeño orificio por donde circula el aceite y la tapilla inferior es totalmente lisa. Tanto la tapilla superior como la inferior tienen un pequeño sobresalto para que no se pueda confundir cuando se coloca. Los apoyos de la bancada del cigüeñal reciben el nombre de sombreretes, los cuales mantienen el cigüeñal suspendido y que son sujetos por medio de espárragos y tuercas que llevan un determinado apriete. Si después del montaje se detecta una temperatura elevada en los apoyos de las bancadas y las muñequillas de biela, debemos revisar el suministro de aceite para lubricación y lo mismo en ambas tapillas. También hay que tener en cuenta que el cigüeñal del motor puede tener desviaciones. Observamos a continuación una imagen de las tapillas de bancada:

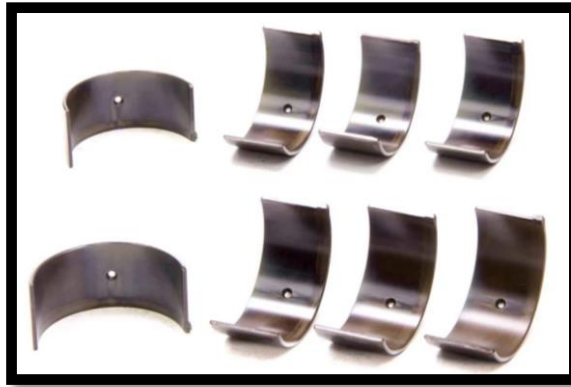


Ilustración 59: Tapillas de biela y de bancada de "C1J". Fuente: Trabajo de campo.

### 5.5.16. Cojinete de empuje o axial del motor "C1J":

Las tapillas de empuje, o más conocidas por tapillas axiales, van colocadas en el lado de arranque del motor y que va combinado con el volante de motor, que es el cojinete cero. Los sombreretes y los casquillos del cojinete cero tienen la misma forma que las tapillas principales o de bancada, pero lo único que varía es su tamaño. Los axiales cumplen la función de guiar al cigüeñal de manera axial. Los axiales inferiores se mantienen colocados en su sitio para que no se den la vuelta gracias a los espárragos de sujeción. Las tapillas axiales se desmontan y se vuelven a montar de la misma manera que se hace con las tapillas de biela y de bancada. En la siguiente imagen se ven las tapillas axiales:



Ilustración 60: Tapillas axiales de "C1J". Fuente: Trabajo de campo.

### 5.5.17. Volante de inercia o volante motor "C1J":

El volante de motor tiene forma de disco y se coloca en un extremo del cigüeñal para suministrar la inercia necesaria al motor, dado que si el motor no tiene un contrapeso determinado el motor no funcionaría. La función principal del volante de motor es hacer que el motor sea estable en altas y bajas rpm. Un ejemplo clave son los

coches de calle que muchas veces les cuesta bajar el número de vueltas de motor y es porque el volante de motor es mucho más pesado, en cambio el motor al que vamos a llevar a cabo la prueba de la inyección de agua se compone de un volante de motor aligerado de uso exclusivo para competición. Casi todos los volantes de motor están fabricados de acero o hierro fundido. En la siguiente imagen, vemos un volante de motor de un motor “Cleón Fonte” que hemos desarmado exclusivamente para que se vea cada una de las piezas de las que se compone el motor. Se trata de un volante de motor totalmente original:



Ilustración 61: Volante de motor de “C1J”. Fuente: Trabajo de campo.

### 5.5.18. Bobina de encendido de motor “C1J”:

La bomba del motor “C1J” del Renault 5Gt Turbo se trata de un mecanismo eléctrico que forma parte del encendido del propio motor, cuya finalidad es la producción de una carga de alto voltaje. Esta bobina de encendido está compuesta por un sistema que se encarga de transformar la energía eléctrica, que a través del método de inducción magnética, genera una tensión eléctrica determinada por medio de dos enrollados en el interior. El enrollado de baja tensión es el primero conectado por medio de un cableado a una batería de 12V en alta tensión alrededor de 15-20 mil voltios. Esta corriente es enviada por medio de un cable de fabricación bastante especial hasta el delco y luego se envía a cada una de las bujías en el momento exacto de la explosión del combustible. Se muestra una bobina del motor “Cleon-Fonte”:



Ilustración 62: Bobina de encendido de "C1J". Fuente: [28]

### 5.5.19. Distribuidor o delco del motor "C1J":

El distribuidor o delco es uno de los elementos más importantes para suministrar la chispa en el momento adecuado. Para que el delco funcione correctamente se debe sincronizar su giro con el giro del propio cigüeñal, de tal manera que cuando el motor gira se hace girar un contacto que hay dentro de la tapa del delco y cada bujía recibe en su momento dicha carga de voltaje que es necesario para que se genere la chispa y se inflame la mezcla aire/combustible en el interior del cilindro. Para ello, se ve cómo es el delco de un motor "Cléon-Fonte":



Ilustración 63: Delco del "C1J". Fuente: Trabajo de campo.

### **5.5.20. Bomba de combustible del motor “C1J”:**

La bomba de combustible, en el caso de los motores de los Renault 5 GT Turbo, es de accionamiento mecánico y dicho movimiento se logra gracias al árbol de levas. La principal función de esta bomba es absorber gasolina del tanque y mandarla a la cubeta del carburador para que sea usada para el proceso de combustión del motor. En la actualidad, se ha sustituido este accionamiento mecánico por una bomba eléctrica y que mantienen de manera constante una presión determinada. La bomba más común y que se usa en el motor al cual realizamos el estudio es la que se muestra en la siguiente imagen:



**Ilustración 64:** Bomba de gasolina del “C1J”. Fuente: Trabajo de campo.

### **5.5.21. Carburador o inyector manual de combustible del motor “C1J”:**

La principal función principal del carburador es llevar a cabo la mezcla de aire/combustible en la proporción adecuada para lograr una combustión correcta de dicho motor. El carburador genera un pulverizado muy fino para crear una mezcla determinada en función de lo que pida el motor. El carburador empleado en el motor del sistema de inyección de agua es de tiro ascendente, cuya función principal es hacer pasar el aire por la parte baja del carburador y sale por la parte alta, aunque también se emplean otros tipos de carburadores que son de tiro descendente y mucho más seguros porque evitan el chorreado.

El funcionamiento de un carburador es muy simple dado que se trata de un conducto cuya finalidad es permitir la entrada de aire/combustible al interior del motor por medio de las válvulas de admisión que se encuentran en dicho momento abiertas.

El carburador que se muestra a continuación es el más usual, que es el carburador Solex:



Ilustración 65: Carburador Solex del "C1J". Fuente: [29]

#### **5.5.22. Sistema de lubricación o bomba de aceite de motor "C1J":**

La bomba de aceite en todos los motores es la encargada de lubricar por medio de alta presión a través del movimiento generado por el propio movimiento del cigüeñal del motor. Algunas partes que lubrica dicha bomba de aceite son:

- ⇒ Tapillas de biela.
- ⇒ Tapillas de bancada.
- ⇒ Superficie del cilindro.
- ⇒ Árbol de levas.
- ⇒ Componentes móviles auxiliares.

En la lubricación se intenta asegurar que todos los mecanismos móviles del motor sean lubricados de la manera más adecuada posible.





**Ilustración 66:** Bomba de aceite de "C1J". Fuente: Trabajo de campo.

El sistema de lubricación de este motor se encarga de dispersar el aceite por todos los lugares móviles para evitar roturas por fricción entre las superficies. Los beneficios de emplear el sistema de lubricación son:

- Si se reduce la fricción, el motor no necesita tanto esfuerzo para seguir avanzando y manteniendo su funcionamiento.
- Reduce la cantidad de pérdidas de potencia.
- Empleo de menor cantidad de combustible dado que se reduce la temperatura en el interior del motor.
- Reducción del desgaste de piezas.
- Amortigua las vibraciones causadas por el funcionamiento del motor.
- Reducción de gastos en reparaciones.
- Ayuda en la lubricación de los aros además de producir un efecto de sellado.

La principal función del sistema de lubricación del motor es repartir el aceite por la mayor parte del motor, principalmente a las partes móviles con la finalidad de reducir el número de fricciones por las superficies. Los beneficios del sistema de refrigeración son los siguientes:

- Reducción de fricciones, el esfuerzo llevado a cabo es menor y su funcionamiento es más correcto.
- Reducción considerable de las pérdidas de potencia.
- Reducción en el consumo de combustible, porque la temperatura del motor se ha reducido considerablemente.
- Reducción de la fricción entre las piezas móviles.
- Reducción de vibraciones generadas por el funcionamiento del propio motor.
- Autolimpieza interna del motor.
- Las reparaciones se reducen de manera considerable.

- Aumento del sellado de los aros de los pistones.

A continuación, se nombrarán los principales componentes del sistema de lubricación:

- **Bandeja de aceite:** La función principal de la bandeja de aceite es acumular todo el aceite que ha sido repartida por todo el motor gracias a la bomba de aceite.
- **Bomba de aceite:** La bomba suministra presión y cantidad de aceite para suministrar la lubricación adecuada al motor. La bomba es movida por medio del movimiento del motor ya sea por los siguientes elementos:
  - o El cigüeñal.
  - o El árbol de levas.
  - o El distribuidor.
  - o La cadena de distribución.
- **Regulador de presión:** La bomba de lubricación está compuesta por una válvula reguladora de presión para evitar que dicho exceso de presión rompa los retenes y las juntas.
- **Filtro de aceite:** El filtro de aceite como su propio nombre indica tiene la tarea encomendada de filtrar dicho aceite.
- **Tubo de recogida de aceite:** El tubo de recogida de aceite, o conocido también como chupona de aceite, es el encargado de encaminar el aceite hasta la bomba de aceite para posteriormente ser impulsado dicho aceite.
- **Luz o indicador de presión de aceite:** Todo motor dispone de una válvula que actúa como sensor para determinar si la presión que está suministrando la bomba es correcta.
- **Enfriador de aceite:** Como su propio nombre indica, la función del enfriador es evitar que el aceite llegue a determinadas temperaturas dado que entre más líquido se vuelva el aceite, más se nos reduce la presión de este.

Las partes que reciben lubricación de la bomba son las siguientes:

- Tapillas de biela y de bancada.
- Paredes del cilindro.
- Aros o anillos del cilindro.
- Árbol de levas.
- Válvulas de admisión y escape.
- Engranajes de movimiento.
- Bulón de pistón.

- Varillaje empujador.
- Engranajes de la bomba de lubricación.
- Bomba de gasolina.
- Sistema de sobrealimentación.
- Pistón y cojinetes de la sobrealimentación.

### **5.5.23. Las bujías del motor “C1J”:**

Una bujía entrega corriente eléctrica que es generada por medio del encendido y luego dicha corriente es transportada por medio de hilos de cobre o de carbón hasta el cilindro. Entonces esta mezcla producida por aire/combustible que se encuentra a presión se enciende por medio de la chispa generada por el sistema de encendido. Las partes principales de una bujía son la parte roscada que es de metal eléctricamente aislado y el electrodo que está hecho de cerámica.

La función principal de la bujía es entregar la corriente eléctrica desde un sistema de encendido hasta llegar a la cámara de combustión.

La carcasa de metal de las bujías se atornilla en la culata del motor, por lo que está eléctricamente conectada a tierra. Las bujías generalmente requieren un voltaje de 12.000 a 25.000V o más para llegar a producir la chispa de forma correcta.

El tipo de bujías empleado en el motor “C1J” tiene que ser exactamente de la marca Champion y con referencia: N3G como se ve en la siguiente imagen:



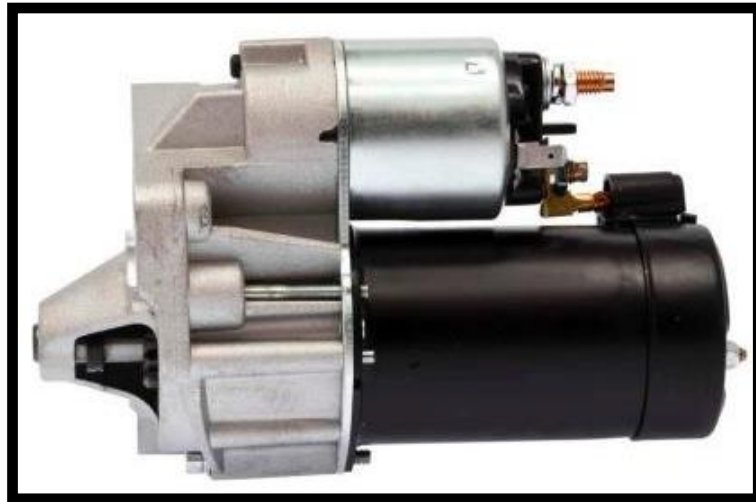
Ilustración 67: Bujías N3G de “C1J”. Fuente: [30]

### **5.5.24. Motor de arranque del motor “C1J”:**

Los motores de arranque de los Renault 5 GT Turbo son como los que se muestran en la siguiente imagen. Se trata de un motor eléctrico bastante especial,

aunque sus dimensiones son muy pequeñas comparado con el tamaño del propio motor al que le suministra el movimiento para ser arrancado. Este tipo de bujías que monta el motor “C1J” inyecta una fuerte potencia eléctrica que hace mover el motor.

El motor de arranque está compuesto de un “Bendix”, que se pone en funcionamiento cuando se le suministra corriente eléctrica. Esto produce el movimiento de una palanca que es movida por medio de un electroimán y éste engrana con el volante de inercia y produciendo el arranque del respectivo motor.



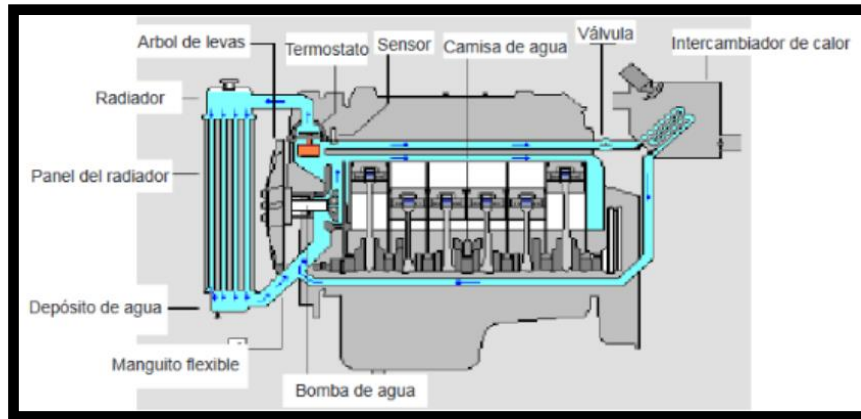
**Ilustración 68:** Motor de arranque del “C1J”. Fuente: Trabajo de campo.

### **5.5.25. Sistema de refrigeración del “C1J”:**

Sin olvidarnos del medio de refrigeración del motor, éste se compone de varios elementos para llevar un óptimo sistema de refrigeración, cuya finalidad es lograr mantener una temperatura normal para el correcto funcionamiento del motor, ya sea en régimen de trabajo o no.

El sistema de refrigeración tiene como función la de evacuar gran parte de ese calor que se produce por el roce y el movimiento del motor y también un factor importante es la combustión de los gases en el interior del motor.

En caso de que el motor no trabaje a la temperatura óptima sino por debajo puede generar un gran desgaste de los elementos móviles. La refrigeración del motor se realiza por medio de líquido, cuya función principal es extraer el calor generado por la combustión y el rozamiento de los diferentes mecanismos. Todo el bloque de motor está sumergido en un baño de agua refrigerante que absorbe dicho calor como vemos en la siguiente imagen que se muestra:



**Ilustración 69:** Método de refrigeración del "C1J". Fuente: [31]

En el caso del motor "Cleón-Fonte" se emplea como método de refrigeración un método que hace circular agua por medio del circuito a presión a través de la bomba de agua y por todo el bloque y la culata del motor.

La finalidad del medio de refrigeración es poner el agua refrigerante en contacto directo con las paredes del cilindro. Cuando esta agua refrigerante ya ha absorbida, la temperatura es transportada hasta el bote de expansión y pasa por el radiador para luego llevar a cabo el mismo recorrido.

Los elementos principales de los que consta el circuito de refrigeración del Renault 5 GT Turbo son los siguientes:

1. **El radiador:** El radiador se coloca en la parte que reciba más ventilación. En nuestro caso se coloca en la parte de adelante del coche, detrás del intercooler, pues de esta forma pasa el aire por los paneles y las aletas de refrigeración en cuanto el vehículo se pone en movimiento. Vemos a continuación una imagen del radiador que le han colocado recientemente al Renault 5 GT Turbo que se le lleva a cabo el estudio:



Ilustración 70: Radiador del "C1J". Fuente: [32]

2. **La bomba:** La circulación del agua refrigerante se lleva a cabo gracias al giro suministrado por la polea del cigüeñal del motor a la bomba de agua y su posición exactamente es en medio de todo el circuito, así va recogiendo el calor de forma más rápida. A mayor giro del motor, mayor será la temperatura que puede alcanzar. Como el giro del motor es el mismo que el de la bomba dado que se mueve por medio de una correa, mayor será la cantidad de calor que se evacúa. Vemos a continuación la bomba que se emplea en el motor "C1J":



Ilustración 71: Bomba de agua del "C1J". Fuente: Trabajo de campo.

3. **La válvula reguladora de la temperatura o termostato:** La función de la válvula reguladora de temperatura o termostato es conseguir que el motor mantenga una temperatura adecuada para un funcionamiento correcto del mismo y así evitar el desgaste de los elementos móviles. La temperatura de funcionamiento normal de este motor es de 90°C, incidiendo ésta directamente sobre el sistema de engrase del propio motor y mucho más en la alimentación

de este. Cuando el motor se encuentra a temperatura ambiente el aceite está con una mayor densidad y por lo tanto es mucho más costoso hacer mover la mayoría de los elementos del motor. El termostato empleado para regular la temperatura de refrigeración en estos motores es la siguiente:



Ilustración 72: Termostato del "C1J". Fuente: [33]

4. **El ventilador:** En el caso de este motor, se emplea el ventilador para llevar a cabo una regulación de la temperatura de funcionamiento, funcionando en comunicación con la temperatura que llegue a alcanzar el motor. Para ello el motor en el conducto de refrigeración contiene un interruptor térmico, de esta forma tendremos una refrigeración adecuada y facilita que se alcance de manera rápida la temperatura del régimen. El ventilador no está fijo en funcionamiento, ya que sólo es necesario cuando la velocidad alcanzada por el vehículo es inadecuada. En caso de que sea suficiente, no se pondrá en funcionamiento.
5. **El líquido refrigerante o anticongelante:** Como líquido refrigerante se emplea agua, dado que es bastante estable, resulta muy fácil conseguir y no tiene ningún componente. Cumple la función de refrigeración, pero presenta varios inconvenientes en temperaturas de ebullición dado que se vuelve muy oxidante y ataca de manera agresiva en las partes metálicas.

Normalmente para evitar estas oxidaciones se emplean aguas refrigerantes tratadas para evitar que contengan sales calcáreas que puedan generar obstrucciones en el motor y los sistemas de refrigeración.

Los líquidos refrigerantes empleados suelen estar compuestos por varios componentes con determinados porcentajes:

- ⇒ 45% o 75% de agua desmineralizada o desionizada para evitar corrosiones.
- ⇒ 25% o 50% de un componente que etilenglicol.



⇒ 3% o 8% de otros aditivos que normalmente son antiespumantes, colorantes, antioxidantes, inhibidores de corrosión y muchos otros más.

## **5.6. Estudios llevados a cabo del motor “C1J” con inyección de agua y sin inyección:**

Como se ha nombrado con anterioridad se ha realizado un estudio de un coche que se encuentra en la isla de Tenerife y concretamente en el municipio de Arafo, el cual funciona con el sistema de inyección de agua de manera directa en el colector de admisión. Se mostrarán una serie de imágenes donde se puede ver claramente la realización de las pruebas del motor, además de ver bien señalado la colocación del inyector en el colector de admisión. Como instalación donde se lanzará en banco de prueba el vehículo es en el nuevo “Spark load”, antiguamente localizado en Güimar pero que se ha dirigido hasta la avenida de El Paso en Los Majuelos, perteneciente al municipio de San Cristóbal de La Laguna. A continuación, vemos una imagen de cómo es el motor exteriormente asentado sobre el banco de “Spark load”:



**Ilustración 73:** Renault 5 GT Turbo en “Spark load”. Fuente: Trabajo de campo.

Al fondo de la ilustración 73, se puede ver en la pantalla del banco las primeras lanzadas del motor sin inyección de agua. El sábado 11 de junio de 2022, se llevaron a cabo las primeras lanzadas del motor “C1J”, pero no se pudo obtener ningún resultado porque el motor del vehículo se encontraba con ciertos desperfectos:

⇒ Fugas de aire por el codo de la admisión.



- ⇒ Inyector de agua de un alto flujo.
- ⇒ El carburador no regulaba.
- ⇒ Las mangueras de sobrealimentación se escapaban.
- ⇒ La correa auxiliar se rompió.

Después de arreglar los desperfectos nombrados anteriormente:

- ⇒ Sellado del codo de admisión.
- ⇒ Inyector de agua de menor flujo.
- ⇒ Reparación de carburadores.
- ⇒ Abocardado de las mangueras de sobrealimentación.
- ⇒ Colocación de nueva correa auxiliar.

A fecha de 29 de junio de 2022, se realizan las nuevas lanzadas del vehículo, dándonos la gran diferencia a la que queríamos llegar. Como vemos en la siguiente imagen se pueden ver las pruebas llevadas a cabo durante este día:



**Ilustración 74:** Pruebas de inyección de agua de motor "C1J". Fuente: Trabajo de campo.

A continuación, vemos los diferentes gráficos que nos aportan dichas pruebas. En primer lugar, podemos ver la gráfica de caballaje, el par y los gases generados sin el aporte de la inyección de agua:

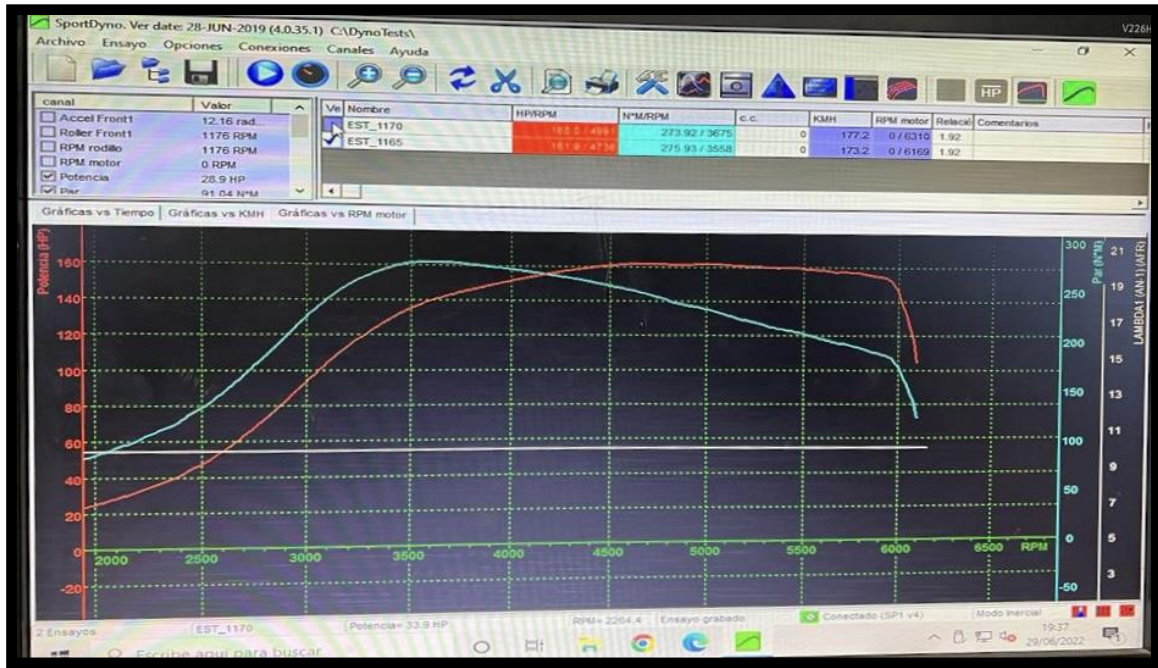


Ilustración 75: Gráfica sin inyección de agua. Fuente: Trabajo de campo.

En segundo lugar, vemos una gráfica comparativa con lo que nos genera de caballaje el motor con y sin inyección de agua:

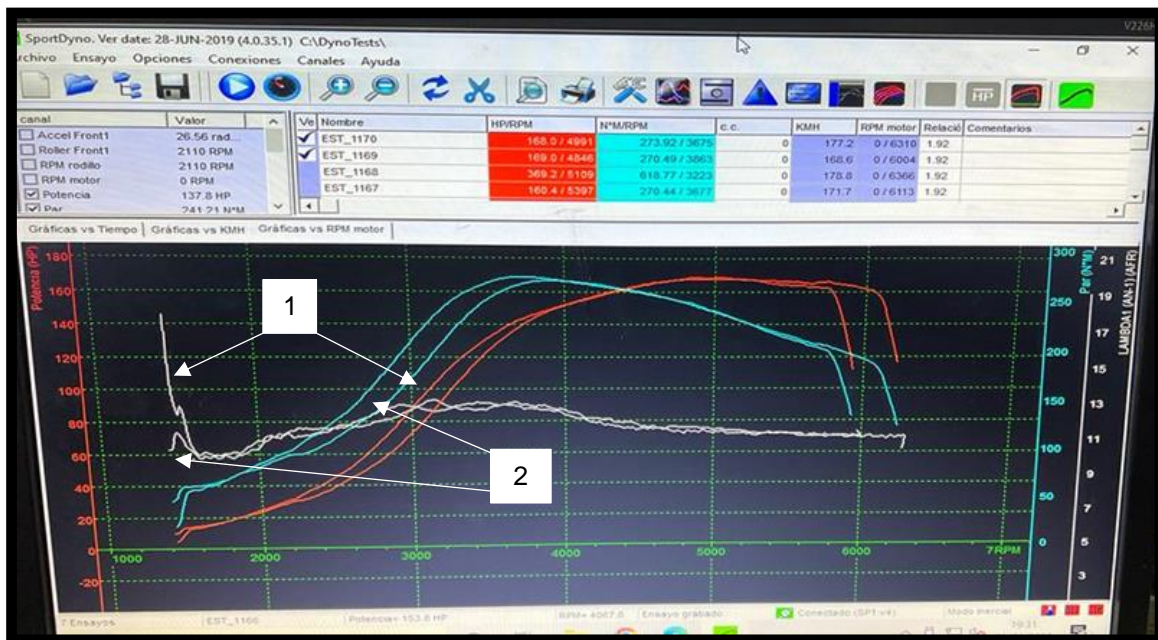


Ilustración 76: Gráfica de comparación. Fuente: Trabajo de campo.

Características de la gráfica:

- Línea azul: Indica el par generado por el motor "C1J".
- Línea roja: Indica el caballaje generado por el motor "C1J".

- Línea blanca: Gases de escape generados por el motor "C1J".

Si seguimos cada una de las líneas podemos ver que la línea azul 1 nos muestra el caballaje del motor con la inyección de agua generando un caballaje de 160.1hp por tanto se ve tanto una mejoría de caballaje como una reducción considerable de los gases de escape generados durante la combustión como se ve en la ilustración 76 donde el número 1 nos muestra la línea de caballaje y la línea blanca las emisiones. Si tenemos en cuenta el caballaje con la inyección de agua nos da un valor de 168hp una diferencia de 8hp con respecto a sin inyectar agua como se muestra en la línea 2 dónde vemos una mejoría de la línea y en cambio las emisiones se reducen que es la línea blanca.

Otra de las cosas importantes que debemos de tener en cuenta como ya se dijo, es que no vamos a emplear el mismo mapa de la centralita para el caso de la inyección de agua. Vemos la siguiente ilustración en donde mostramos claramente los ajustes que se llevaron a cabo en el encendido del motor "C1J" para evitar posibles roturas de motor:





*Ilustración 77: Ajustes de avance de motor. Fuente: Trabajo de campo.*

## **5.7. Aplicaciones de la inyección de agua en los automóviles:**

Hacer penetrar agua en el interior del cilindro en los automóviles es algo muy útil en motores de combustión forzada (turbocompresor o motores sobrealimentados). Solo en casos extremos, como relaciones de compresión muy altas, combustible de muy bajo octanaje o demasiado avance de encendido, puede beneficiar a un motor de aspiración normal.

La inyección de agua es lo mismo que inyectar combustible en el interior del cilindro con la única diferencia que lo que se inyecta en este caso es agua en vez de combustible e incluso el agua se puede emulsionar con alcohol u otro elemento. La inyección de agua no debe confundirse con el rociado de agua en la superficie del

enfriador de carga de entrada, ya que el rociado de agua es mucho menos eficiente y mucho menos sofisticado.

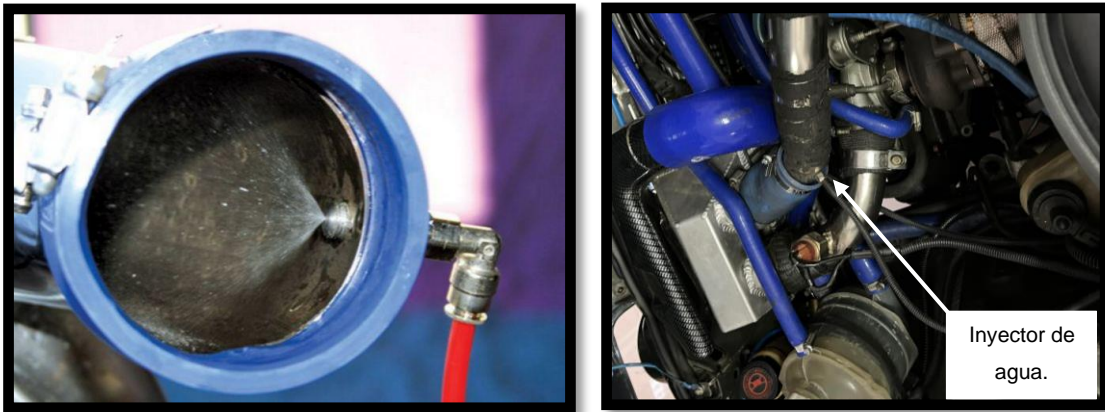
El empleo del turbocompresor esencialmente comprime el aire que ingresa al motor para forzar más aire del que sería posible utilizando la presión atmosférica. Más aire en el motor significa, automáticamente, que se debe inyectar más combustible para mantener el valor estequiométrico adecuado de la relación aire/combustible alrededor de 14:1. Más aire y combustible en el motor implica una mayor potencia. Sin embargo, al comprimir el aire de entrada, el turbocompresor también lo calienta. Las temperaturas más altas del aire conducen a un aire más delgado y, por lo tanto, a una relación estequiométrica alterada que da como resultado mezclas más ricas. Las temperaturas de entrada de aire sobrecalentadas pueden causar una detonación.

La detonación es un efecto también conocido como detonación o ping del motor, ocurre cuando la mezcla de aire/combustible se enciende prematuramente o se quema incorrectamente. En el funcionamiento normal del motor, el frente de la llama viaja desde la bujía a través del cilindro en un patrón predefinido. La presión máxima de la cámara se produce alrededor de los 12 grados después de la llegada del cilindro a la parte alta o PMS y el cilindro es empujado de manera descendente por el interior del orificio.

En algunos casos y por motivos como es la mala mezcla, temperatura del motor o de entrada demasiado alta, combustibles de demasiado bajo octanaje, demasiado avance de encendido, demasiado turbo, etc., el frente de llama primaria iniciado por la bujía puede ser seguido por un segundo frente de llama. Entonces, la presión de la cámara aumenta demasiado rápido para que el movimiento del pistón lo alivie. La presión y temperatura llegan a ser tan grandes que toda la mezcla en la cámara explota de manera descontrolada. Si la fuerza de esa explosión es severa, algunas de las partes móviles del motor (pistones, bielas, válvulas, cigüeñal) pueden llegar a destruirse.

Es muy importante evitar la detonación en cualquier motor, siempre que sea bajando las temperaturas de entrada, utilizando combustible de mayor octanaje, retardando el encendido y, por lo tanto, reduciendo la potencia y la combustión del motor (una situación en la que la alta presión del cárter envía vapores de aceite de regreso a la cámara de combustión), lo que hace funcionar el motor un poco más rico que en la relación estequiométrica. La gran ventaja que se obtienen con esta inyección es que se quema la mezcla de aire/combustible de una manera mucho más eficiente, lo que ayuda a evitar el proceso de detonación y lo que se logra es reducir las temperaturas de la cámara de combustión.

En los motores turboalimentados de alta presión, la mezcla de aire/combustible que ingresa a los cilindros puede, en algunos casos, explotar prematuramente (antes de que se encienda la bujía) debido a las condiciones ambientales extremas del motor. Esta situación es extremadamente destructiva y provoca graves daños en el motor (perforación del pistón). Lo que se intenta evitar es generar graves daños en el interior del motor debido a fenómenos de detonación o preencendido, de tal manera que el combustible no se inyecta solo, sino que en el interior del cilindro también se inyecta agua para generar una mezcla correcta, produciendo una quema muy eficiente y evitando la detonación o preencendido, además de proporcionar refrigeración de aire de entrada adicional y, por tanto, aire más denso. La única función de la inyección de agua es la de evitar la detonación.



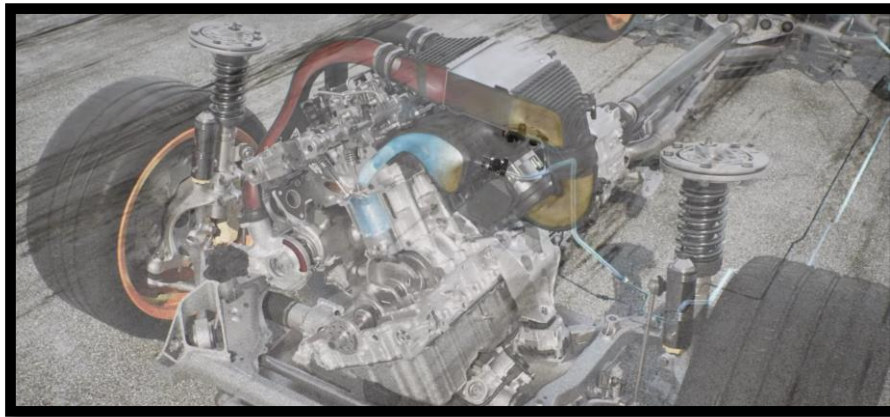
**Ilustración 78:** Sistema de inyección de agua en el colector de admisión del "C1J". Fuente: Trabajo de campo.

Teniendo en cuenta donde se vaya a colocar el inyector de agua podemos tener diferentes variantes:

1. Inyectar agua en la entrada del colector de admisión.
2. Inyección de agua en el tubo de la salida del intercooler.
3. Inyección de agua en la entrada del intercooler y solo se emplea en vehículos de competición.
4. La mayor parte de la prevención de las detonaciones en el cilindro se realiza inyectando combustible adicional que luego se usa como refrigerante (no se quema) y hace funcionar el motor por encima de la relación estequiométrica (es decir, rico).

### **5.7.1. Inyección de agua implementada por la marca BMW para dar 500cv:**

El BMW M4 GTS es el primer automóvil de carretera de producción equipado con un innovador y pionero sistema de inyección de agua. Por medio de este sistema, se produce una mejora en la potencia de aceleración y el consumo de combustible del motor turbo de seis cilindros lineal. Vemos una imagen esquemática de la parte interna del motor:



**Ilustración 79:** *Silueta del funcionamiento del motor BMW M4 GTS. Fuente: [34]*

### **5.7.2. Motor BMW M4 GTS con climatizador propio:**

El agua se inyecta como un rocío fino en la aspiración del motor donde inmediatamente se evapora, ayudando a refrigerar dicha aspiración de manera considerable. Si lo aplicamos en cadena vemos como la temperatura del proceso de compresión también se reduce y disminuye la capacidad de generarse una detonación en el interior del cilindro, favoreciendo el proceso de sobrealimentación y el tiempo en el que se genera el encendido de la mezcla sea mucho más temprana. En lo referido al rendimiento al inyectar agua se benefician todos los componentes dado que tiene la ventaja de actuar como refrigerante. Todas estas características ayudan a reducir la cantidad de desgaste generado y aumentar el uso del motor. Los beneficios de la inyección de agua es que se puede utilizar de varias formas, según el motor y el tipo de vehículo. En particular, los ingenieros tienen una libertad considerable a la hora de decidir como equilibrar sus propiedades entre mayor potencia y eficiencia del combustible. Como se ha dicho con anterioridad, si ponemos sobre de la mesa el tema de la competición se puede emplear un turbocompresor con una mayor relación de impulso y relación de compresión.





Ilustración 80: Chasis de BMW M4 GTS. Fuente: [35]

### **5.7.3. Mayor rendimiento y menos consumo en BMW M4 GTS:**

Si el turbocompresor produce la máxima potencia a las rpm máximas, es posible aumentar la potencia del motor en aproximadamente un 8%. Al mismo tiempo, hay un factor muy influyente y es la temperatura, generando de tal manera un número muy considerado de pérdidas en lo que respecta a la potencia, que pueden compensarse aumentando la cantidad de agua inyectada. De hecho, la potencia se ve afectada por la temperatura de funcionamiento del motor, dado que en realidad se ve claramente que un motor de combustión interna cuando se sobrecalienta pues pierde toda su fuerza y los elementos del motor se gripan. Si se supera una determinada temperatura de funcionamiento, se producirá una combustión descontrolada (detonación) lo que provocará pérdidas de potencia y, en el peor de los casos, daños graves al motor. Si se trata de un motor turboalimentado, el aire de admisión se calienta en el compresor del turboalimentador hasta 160°. Aunque el enfriamiento intermedio se puede usar para enfriar el aire de sobrealimentación, la capacidad de los sistemas de enfriamiento intermedio está físicamente limitada. Según el diseño y el tamaño del sistema, y la aerodinámica del propio vehículo, es posible enfriar el aire de admisión a una temperatura inferior a 70°C antes de que entre en la cámara. Para producir mayor



potencia, ésta se consigue aumentando la presión de sobrealimentación, pero este método no es muy viable dado que se supera el umbral de detonación.

#### **5.7.4. Elevación del caballaje y el par con la agregación del agua:**

Para generar una elevación del caballaje de un motor se intenta inyectar agua con un rocío de agua muy fino en la cámara de admisión, siendo posible reducir la temperatura del aire de admisión en unos 25°C. Este enfriamiento hace posible avanzar la sincronización de la chispa más cerca del valor óptimo. Esto da como resultado un proceso de combustión mucho más eficiente, mientras que al mismo tiempo reduce la temperatura de combustión final. Al mismo tiempo, el aire aspirado al ser mucho más frío, la cantidad de oxígeno es mayor y da como resultado una presión media de combustión más alta, lo que conduce a un desarrollo optimizado de potencia y par. Finalmente, este eficiente sistema de enfriamiento en el cilindro también reduce el valor térmico en una variedad de componentes básicos que incluye una serie de componentes:

- Pistones.
- Válvulas de escape.
- Catalizador.
- Turbocompresor (se incluye debido a las temperaturas tan bajas que alcanzan los gases de escape).

Para elevar el umbral de detonación se emplea la inyección de agua y también contribuye en gran medida a resolver un conflicto fundamental en el diseño de motores de alto rendimiento. Este hecho es causado por dos factores muy fundamentales que afectan de manera directa en la relación de compresión:

- Potencia producida a la salida.
- La cantidad de combustible consumido.

#### **5.7.5. Mayor compresión en el máximo rendimiento con inyección de agua:**

La inyección de agua proporciona una forma particularmente eficaz de elevar el umbral de detonación en este rango, lo que permite aumentar la relación de compresión. Esto hace posible optimizar la potencia de salida del motor turboalimentado en un amplio

rango operativo. Cuanto menor sea el octanaje del combustible, mayor será el potencial de esta tecnología. En términos de implementación práctica, los ingenieros de diseño de BMW M optaron por una disposición en la que los tres inyectores de agua en la cámara de admisión suministran agua a dos de los cilindros del motor de seis cilindros en línea. Esta solución permite una distribución uniforme del agua y un diseño de un sistema compacto.

Un hueco de almacenamiento bajo el suelo del interior del maletero del vehículo alberga un depósito de agua de 5 litros, la bomba de agua, los sensores y las válvulas. La bomba y todos los sensores y actuadores están controlados por un sistema de gestión del motor ampliado. La bomba suministra agua a los inyectores a una presión de aproximadamente 10 bares. La cantidad de inyección se puede variar según la carga, la velocidad del motor y la temperatura, lo que ayuda a mantener el consumo de agua al mínimo.



**Ilustración 81:** Depósito de acumulación de agua. Fuente: [36]

Durante la conducción dura en pista, el depósito de agua debe rellenarse cada vez que se reposta el vehículo. Por otro lado, en condiciones normales de funcionamiento diario, los intervalos son mucho más largos, dependiendo del estilo de conducción. Incluso en la conducción rápida por autopista, el depósito de agua solo necesita rellenarse cada cinco paradas para repostar. De lo contrario, el sistema no requiere mantenimiento para una máxima practicidad diaria.



Ilustración 82: Motor BMW M4 GTS. Fuente: [35]

## **7. Conclusiones:**

## **6. Conclusiones:**

En este último apartado del Trabajo de Fin de Grado veremos las conclusiones a las que hemos llegado con este estudio de la inyección de agua. Claramente no se ve un gran aumento de caballaje en el motor debido a que el sistema empleado es muy rudimentario y no es sofisticado, pero podemos ver que se está empleando este método en motores BMW y en muchos otros automóviles.

- ⇒ Se ha podido ver de dónde ha surgido este método de inyección de agua desarrollado en el apartado antecedentes y justificación, en el cual hemos observado la gran importancia que tiene la inyección de agua en los motores de aviación de la Segunda Guerra Mundial.
- ⇒ Hemos intentado desarrollar los diferentes métodos que se han estudiado durante la historia para el uso de la inyección de agua.
- ⇒ Hemos realizado un despiece del motor del cual llevamos a cabo el estudio de la inyección de agua para ver claramente cuáles son las partes de las que está compuesto.
- ⇒ En el penúltimo apartado de resultados vemos las aplicaciones que se le han dado a la inyección de agua en la actualidad y los beneficios que nos genera el empleo de este método.

Como conclusión de este TFG, hemos podido descubrir que la inyección de agua se puede implantar en motores de buques sin llevar a cabo el cambio del motor ni realizar una instalación o modificación importante. Un ejemplo claro de ello es el caso de motores que para su arranque emplean combustible menos pesado y después durante su funcionamiento normal utilizan combustible pesado. ¿A qué es debido esto? Esto es debido a que el combustible menos pesado es más caro, usándolo así para el arranque, mientras que el combustible más pesado, como es el caso del fuel, es más barato. Dado que antiguamente no existían estos métodos, se intenta plasmar con este estudio realizado que los motores instalados ya en buques se pueden innovar aplicándole este sistema de inyección de agua sin necesidad de hacer ningún tipo de modificación.

## **8. Bibliografía:**

## 7. Bibliografía:

En el desarrollo de nuestro Trabajo de Fin de Grado hemos empleado referencias bibliográficas que son las siguientes:

- [1] Borowski, G., & Ghazal, O. H. (2019). Use of Water Injection Technique to Improve Efficiency of the Spark-Ignition Engine: A Mood . Journal of Ecological Engine , 20(2):226-233.
- [2] Falfari, S., Bianchi, G. M., Cazzoli, G., Forte, C., & Negro, S. (2018). Basics on Water Injection Process for Gasoline Engines . Energy Procedia , Volume 148, 50-57.
- [3] Mayo Sanz, P. (2013). Water injection in supercharged engines. Retrieved from Pistonudos: <https://www.pistonudos.com/en/water-injection-in-supercharged-engines>
- [4] Nicolas, R. (n.d.). BMW tries direct water injection in its 3-cylinder gasoline engine. Retrieved from Car Engineer : <https://www.car-engineer.com/bmw-tries-direct-water-injection-in-its-3-cylinder-gasoline-engine/>
- [5] Renault Super 5 GT Turbo Ficha Técnica. (n.d.). Retrieved from ultimateSPECS: <https://www.ultimatespecs.com/es/car-specs/Renault/6375/Renault-Super-5-GT-Turbo.html>
- [6] Water Injection - A Technical Description. (n.d.). Retrieved from Rallycars.com: <https://rallycars.com/technical-stuff/water-injection-a-technical-description/>
- [7] *North American "P-51 Mustang"*. (22 de marzo de 2012). Obtenido de Patrouille De France Flightgear : <https://equipe-flightgear.forumactif.com/t918-north-american-p-51-mustang>
- [8] Planas, O. (9 de abril de 2010). Diferencias entre el ciclo teórico y real de un motor diésel. Obtenido de Demotor: <https://demotor.net/motores-termicos/motor-diesel/diferencia-ciclo-diesel-real-y-teorico>
- [9] Caterpillar. (s.f.). Grupo Motor - Generador Caterpillar G3520E CHL. Obtenido de [https://www.finanzauto.es/images/documentos/productos/soluciones\\_energeticas\\_propulsion/gas/3520EGGW200050-01%20%282013%29.pdf](https://www.finanzauto.es/images/documentos/productos/soluciones_energeticas_propulsion/gas/3520EGGW200050-01%20%282013%29.pdf)
- [10] Jaramillo Císcar, D. (2014). PARTIAL NEEDLE LIFT AND INJECTION RATE SHAPE EFFECT ON THE FORMATION AND COMBUSTION OF THE DIESEL SPRAY. Obtenido de Universitat Politècnica de València : <https://riunet.upv.es/handle/10251/37374>
- [11] Motores Sobrealimentados. (04 de marzo de 2013). Obtenido de Mecánica y Motores: <http://www.mecanicaymotores.com/motores-sobrealimentados.html>

- [12] veleztecno. (27 de noviembre de 2017). *Makinando*. Obtenido de Posición de las válvulas de un motor Otto 4T en cada tiempo: <https://makinandovelez.wordpress.com/2017/11/27/posicion-de-las-valvulas-de-un-motor-otto-4t-en-cada-tiempo/>
- [13] NEO. (15 de enero de 2010). *Principio de funcionamiento de un motor dos tiempos*. Obtenido de Overblog: <http://2t-purasangre.over-blog.com/article-principio-de-funcionamiento-de-un-motor-dos-tiempos-43020417.html>
- [14] *Las máquinas térmicas*. (s.f.). Obtenido de <https://sites.google.com/site/queesunamaquinatermica/combustion-interna/4-1-el-motor-de-4-tiempos>
- [15] Singh, E., Hlaing, P., & Dibble, R. W. (2020). Investigating Water Injection in Single-Cylinder Gasoline Spark-Ignited Engines at Fixed Speed. *energy&fuels* , 16636-16653.
- [16] Wu, Z.-J., Yu, X., Fu, L.-Z., Deng, J., Hu, Z.-J., & Li, L.-G. (2014). A high efficiency oxyfuel internal combustion engine cycle with water direct injection for waste heat recovery. *Energy* , 110 - 120.
- [17] Nour, M., Kosaka, H., Abdel-Rahman, A. K., & Bady, M. (2016 ). Effect of Water Injection into Exhaust Manifold on Diesel Engine Combustion and Emissions. *Energy Procedia* , 178 - 187 .
- [18] Mingrui, W., Thanh Sa, N., Fiifi Turkson, R., Jinping, L., & Guanlun, G. (2017). Water injection for higher engine performance and lower emissions. *Journal of the Energy Institute* , 285-299.
- [19] Alam Fahd, M. E., Wenming, Y., Lee, P., Chou, S., & Yap, C. R. (2013). Experimental investigation of the performance and emission characteristics of direct injection diesel engine by water emulsion diesel under varying engine load condition. *Applied Energy* , 1042 - 1049.
- [20] Hassan, M. I., & Brimmo, A. T. (2015). Modeling In-Cylinder Water Injection in a 2-Stroke Internal Combustion Engine. *Energy Procedia*, 2331-2336.
- [21] Bozza, F., De Bellis, V., & Teodosio, L. (2016). Potentials of cooled EGR and water injection for knock resistance and fuel consumption improvements of gasoline engines . *Applied Energy* , 112 - 125.
- [22] Mingrui, W., Thanh Sa, N., Fiifi Turkson, R., Jinping, L., & Guanlun, G. (2017). Water injection for higher engine performance and lower emissions. *Journal of the Energy Institute* , 285-299.



- [23] Hoppe, F., Thewes, M., Baumgarten, H., & Dohmen, J. (2016). Water injection for gasoline engines: Potentials, challenges, and solutions . *International of Engine Research*, 86 - 96.
- [24] Greeves, G., Khan, I., & Onion, G. (1977). Effects of water introduction on diesel engine combustion and emissions. Symposium (International) on Combustion, 321 - 336.
- [25] Automotriz, K. (22 de agosto de 2020). El Pistón. Obtenido de Kestrel: <https://www.kestrelautomotriz.ver.pe/2020/08/el-piston.html>
- [26] La Biela. (12 de julio de 2021). Obtenido de blogMeánicos: <http://www.blogmecanicos.com/2021/07/la-biela.html>
- [27] TOPRAN 114 736 Válvula, ventilación cárter. (s.f.). Obtenido de AUTODOC: [https://www.autodoc.es/topran/7998595?gshp=1&gclid=Cj0KCQjwvqvVBhCVARIsAFUxcRs1XFwW6fPv1ZYzkBxqVfnliNhBSdXOkIUjPeQShC98ltg94w4FKPqaAj59EALw\\_wcB](https://www.autodoc.es/topran/7998595?gshp=1&gclid=Cj0KCQjwvqvVBhCVARIsAFUxcRs1XFwW6fPv1ZYzkBxqVfnliNhBSdXOkIUjPeQShC98ltg94w4FKPqaAj59EALw_wcB)
- [28] ENCENDIDOS RENAULT TURBO. (s.f.). Obtenido de Mta Motorsport: <https://mtamotorsport.com/informacion-tecnica/encendidos-motor/encendidos-renault-turbo/>
- [29] CARBURADOR SOLEX 32 DIS ¡NUEVO! (s.f.). Obtenido de GTT-STORE: <http://gtt-store.es/carburador-y-alimentacion/674-carburador-solex-32-dis-nuevo.html>
- [30] BUJIA N3G CHAMPION. (s.f.). Obtenido de GTT-Store: <http://gtt-store.es/tienda/174-bujias-n3g-champion.html>
- [31] Utrillal, D. (07 de mayo de 2021). Sistema de refrigeración de un vehículo. Obtenido de Espaciocoche.com: <https://espaciocoche.com/sistema-de-refrigeracion-de-un-vehiculo/>
- [32] Renault 5 Gt Turbo Nuevo 36MM Core Aleación Radiador de agua de refrigeración Completa + Enfriador De Aceite. (s.f.). Obtenido de Ebay: <https://www.ebay.es/itm/311654435053>
- [33] Termostato, refrigerante GATES TH01489. (s.f.). Obtenido de recambioscoches.es: <https://www.recambioscoches.es/gates/1238229>
- [34] VIDEO: SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA PARA EL AUTO BMW M4 GTS – ANIMACIÓN 3D. (s.f.). Obtenido de Automotivemechanic: <https://www.automotivemechanic.org/blog/32-video-water-injection-system-bmw-w4-gts-car-3d-animation>

[35] BMW. (07 de Oktober de 2015). 5 LITER WASSER FÜR 500 PFERDE. Obtenido de BMW: <https://www.bmw-m.com/de/topics/magazine-article-pool/5-liter-wasser-fuer-500-pferde.html>

[36] HOW THE BMW M4 GTS WATER INJECTION SYSTEM WORKS. (15 de July de 2017). Obtenido de Bimmertips: <https://bimmertips.com/bmw-m4-gts-water-injection-explained/>