



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

### *MODIFICACIÓN DE UN MOTOR DIESEL PARA SU FUNCIONAMIENTO CON ACEITE VEGETAL*

#### Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** Pedro Herraiz Fernández

**DIRECTORES:** Miguel Ángel Álvarez Feijoo  
Guillermo Lareo Calviño

**CURSO ACADÉMICO:** 2015-2016

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

### *MODIFICACIÓN DE UN MOTOR DIESEL PARA SU FUNCIONAMIENTO CON ACEITE VEGETAL*

#### **Grado en Ingeniería Mecánica**

Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida<sub>de</sub>Vigo



# **RESUMEN**

El presente trabajo es el estudio de las modificaciones que se deberían llevar a cabo para hacer funcionar un motor Diesel tradicional con aceite vegetal o biodiesel.

Incluye una introducción a las mecánicas basadas en este ciclo de combustión incluyendo su historia, funcionamiento y sistemas principales que la componen.

Abordando el tema de los biocombustibles se comienza con una introducción al biodiesel de origen vegetal así como algunos de los diversos experimentos que se han realizado sobre su utilización en mecánicas Diesel.

Se continúa con un estudio sobre la problemática que presenta el empleo de los combustibles de origen vegetal, principalmente su diferente densidad, viscosidad, propiedades frías y compatibilidad de materiales con respecto al gasóleo convencional. Se desarrolla posteriormente una posible solución basada en el aumento de temperatura del combustible previamente a su utilización, para asemejar sus propiedades a las del combustible fósil.

Finalmente se presenta un ejemplo de modificación para uso de biodiesel sobre un motor Nissan RD-28 y se presupuesta la misma, estableciéndose además una serie de conclusiones extraídas del proyecto completo y unas líneas futuras de investigación.

## **PALABRAS CLAVE**

Motor, Diesel, biocombustible, biodiésel modificaciones, automóvil



# AGRADECIMIENTOS

Considero obligado dedicar y agradecer este trabajo de fin de grado a mi padre, Cesar B. Herraiz de Miotra, quien no sólo prestó de manera totalmente desinteresada su preciado Nissan Patrol Top Line de 1991 para este proyecto, sino que es además el culpable de mi casi desaforada afición por la mecánica. Siempre me ha prestado sus herramientas que una y otra vez he perdido, y se ha pasado horas conmigo en el garaje, rodeados de tornillos y tuercas, arreglando muchas veces lo que previamente yo mismo había roto. Espero estar a su altura cuando sea padre.

También quiero agradeceré a mi madre, Loreto Fernández Fernández de los Ríos, quien sin saber ni cómo funciona un motor de cortacésped ha estado apoyándome desde niño para que desarrollase la pasión que ahora tengo. Esperé muchas horas que yo volviera de hacer pruebas a mis reparaciones mientras la cena se quedaba fría. Me consoló ante los enfados de mi padre y nunca me ha fallado ni me ha pedido nada más que tuviese cuidado.

A mi hermano Cesar Herraiz Fernández, Tote, le debo agradecer inmensamente que su admiración y orgullo hacia mi han sido mi mayor motivación en esta vida, sin él no habría llegado hasta aquí y este proyecto nunca hubiera sido realidad.

Mi abnegada novia María Delgado González, que estuvo dispuesta a corregir las faltas de ortografía de este proyecto, siempre tuvo unas palabras de ánimo y cariño ante todas las frustraciones que se me fueron presentando durante su realización. Ha soportado enfados, horas de espera y nada le ha quitado la sonrisa. Muchas gracias por estar ahí.

Así mismo me gustaría mostrar mi agradecimiento a mi abuelo Santiago Fernández Pirla, catedrático de arquitectura y mi mayor ejemplo en lo que a superación y éxito en la carrera profesional se refiere. Gran persona y padre de seis hijos, que ha demostrado a lo largo de toda su vida que con esfuerzo y trabajo continuo se puede llegar a lo más alto de forma honrada.

Por último corresponde un agradecimiento a mi tutor, Miguel Ángel Álvarez Feijoo. Profesor de mecánica como pocos he conocido. Dedicado a su profesión y dispuesto a ser todo lo estricto que sea necesario sin importarle el amiguismo con sus alumnos. He aprendido de él y le recordaré como alguien imprescindible en este grado que ahora termino.



## CONTENIDO

|       |                                                                          |    |
|-------|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Introducción: La mecánica Diesel .....                                   | 1  |
| 1.1   | Historia de los motores Diesel .....                                     | 1  |
| 1.2   | Funcionamiento y subsistemas del motor Diesel .....                      | 7  |
| 1.2.1 | Los motores de 2 y de 4 tiempos .....                                    | 9  |
| 1.2.2 | Sistema de distribución .....                                            | 12 |
| 1.2.3 | El sistema de admisión .....                                             | 16 |
| 1.2.4 | El sistema de inyección .....                                            | 18 |
| 1.2.5 | El sistema de refrigeración .....                                        | 23 |
| 1.2.6 | El sistema de lubricación .....                                          | 25 |
| 1.3   | Gasóleo, combustible tradicional de las mecánicas de ciclo Diesel .....  | 25 |
| 1.4   | Objetivo del Trabajo y estructuración de la Memoria: .....               | 28 |
| 2     | El biodiésel .....                                                       | 31 |
| 2.1   | Situación actual de los biocombustibles .....                            | 31 |
| 2.1.1 | Los biocombustibles. ....                                                | 31 |
| 2.1.2 | Clasificación de los biocombustibles.....                                | 32 |
| 2.1.3 | Aceites Vegetales como materia prima para la obtención de biodiésel..... | 33 |
| 2.2   | El biodiésel como combustible de los motores de ciclo Diesel. ....       | 34 |
| 2.2.1 | El experimento de Volkswagen .....                                       | 34 |
| 2.2.2 | El experimento de la Universidad de Missouri.....                        | 36 |
| 2.2.3 | El Experimento del INTA.....                                             | 37 |
| 2.2.4 | El Experimento de la UCLM en colaboración con la UDEA.....               | 39 |
| 2.2.5 | El Experimento de la Universidad del Valle de Guatemala. ....            | 41 |
| 3     | Problemática del biodiésel para su uso en motores Diesel.....            | 45 |
| 3.1   | Densidad y viscosidad.....                                               | 45 |
| 3.1.1 | Densidad .....                                                           | 48 |
| 3.1.2 | Viscosidad.....                                                          | 51 |
| 3.1.3 | Temperaturas obtenidas .....                                             | 53 |
| 3.2   | Propiedades frías del biodiésel.....                                     | 53 |
| 3.3   | Compatibilidad de los materiales: .....                                  | 58 |
| 3.3.1 | Compatibilidad con materiales plásticos: .....                           | 60 |
| 3.3.2 | Compatibilidad con materiales metálicos .....                            | 62 |

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.4 La dilución del aceite. ....                                    | 63  |
| 4 Modificación de un motor Diesel para adaptarlo a biodiésel: ..... | 65  |
| 4.1 Nissan Patrol Top Line RD28T .....                              | 65  |
| 4.1.1 Historia. El Nissan Patrol en España. ....                    | 65  |
| 4.1.2 Aplicaciones militares .....                                  | 68  |
| 4.2 Motor Diesel RD28T .....                                        | 70  |
| 4.2.1 Historia y versiones del motor .....                          | 70  |
| 4.2.2 Características Técnicas.....                                 | 73  |
| 4.2.3 Determinación del consumo de Combustible: .....               | 74  |
| 4.3 Sistema de alimentación de biocombustible .....                 | 74  |
| 4.3.1 Esquema del sistema de combustible y modificaciones. ....     | 74  |
| 4.3.2 Componentes .....                                             | 78  |
| 4.3.3 Presupuesto .....                                             | 82  |
| 5 Conclusiones y líneas futuras .....                               | 85  |
| 5.1 Conclusiones .....                                              | 85  |
| 5.2 Líneas Futuras .....                                            | 86  |
| 6 Bibliografía.....                                                 | 89  |
| 7 Anexos.....                                                       | 91  |
| Anexo I: Esquemas de la instalación.....                            | 92  |
| Esquema de la instalación para climas fríos .....                   | 92  |
| Esquema de la instalación para climas cálidos .....                 | 93  |
| Anexo II: esquemas detallados del Nissan Patrol RD 28T.....         | 94  |
| Bomba de inyección.....                                             | 94  |
| Línea de combustible .....                                          | 95  |
| Sistema de filtrado de combustible .....                            | 96  |
| Sistema de inyección.....                                           | 97  |
| Tanque de combustible .....                                         | 98  |
| Circuito de refrigeración .....                                     | 99  |
| Bomba de agua y ventilador del radiador .....                       | 100 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-1: Rudolf Christian Karl Diesel .....                 | 1  |
| Figura 1-2: Primer motor Diesel.....                           | 2  |
| Figura 1-3: Primer vehículo Diesel .....                       | 3  |
| Figura 1-4: Mercedes260D.....                                  | 3  |
| Figura 1-5: Fiat Croma 1.9TDiD.....                            | 4  |
| Figura 1-6: Alfa Romeo 156 1.9JTD.....                         | 6  |
| Figura 1-7: Audi R10 TDI.....                                  | 7  |
| Figura 1-8: Esquema básico motor de combustión interna .....   | 7  |
| Figura 1-9: Cilindro y pistón .....                            | 8  |
| Figura 1-10: Ciclo Diesel .....                                | 9  |
| Figura 1-11: Motor de 4 tiempos.....                           | 10 |
| Figura 1-12: Ciclo teórico motor Diesel.....                   | 10 |
| Figura 1-13: Ciclo real motor de 4 tiempos .....               | 11 |
| Figura 1-14: Ciclo real motor de 2 tiempos .....               | 12 |
| Figura 1-15: Motor 2 tiempos sin sistema de distribución ..... | 13 |
| Figura 1-16: Sistema OHV.....                                  | 14 |
| Figura 1-17: Sistema SHOC 2 y 4 tiempos .....                  | 15 |
| Figura 1-18: Sistema DOCH .....                                | 15 |
| Figura 1-19: Bomba de barrido .....                            | 16 |
| Figura 1-20: Sistema de turbocompresor .....                   | 17 |
| Figura 1-21: Sistema de inyección .....                        | 18 |
| Figura 1-22: Inyector neumático .....                          | 19 |
| Figura 1-23: Inyector de tobera abierta .....                  | 19 |
| Figura 1-24: Inyector de tobera cerrada .....                  | 20 |
| Figura 1-25: Bomba de combustible rotativa .....               | 21 |
| Figura 1-26: Inyector-bomba.....                               | 22 |
| Figura 1-27: Esquema common-rail.....                          | 23 |
| Figura 1-28: Refrigeración por aire.....                       | 24 |
| Figura 1-29: Refrigeración por agua .....                      | 24 |
| Figura 1-30: Sistema de lubricación.....                       | 25 |
| Figura 1-31: Tipos de Gasóleo .....                            | 26 |

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1-32: Evolución del precio del carburante en España. Ministerio de Industria. .... | 27 |
| Figura 1-33: Evolución del precio del barril de Brent. Ministerio de Industria. ....      | 27 |
| Figura 2-1: Surtidor de biodiésel.....                                                    | 31 |
| Figura 2-2: Cadenas de ácidos grasos triglicéridos [16] .....                             | 33 |
| Figura 2-3: VW Passat 1.6D.....                                                           | 35 |
| Figura 2-4: Dodge RAM 5.9 Cummins Diesel.....                                             | 36 |
| Figura 2-5: Tractor Diesel refrigerado por aire .....                                     | 38 |
| Figura 2-6: Grafica de curvas de potencia. [14].....                                      | 39 |
| Figura 2-7: Nissan Frontier 2.5Di .....                                                   | 41 |
| Figura 2-8: Emisiones a 750RPM [19].....                                                  | 42 |
| Figura 2-9: Emisiones a 2000RPM [19].....                                                 | 42 |
| Figura 2-10: Emisiones a 3000RPM [19].....                                                | 42 |
| Figura 3-1: Densímetro .....                                                              | 46 |
| Figura 3-2: Viscosímetro.....                                                             | 48 |
| Figura 3-3: Grafica Densidad-Temperatura de los combustibles analizados [21] .....        | 49 |
| Figura 3-4: Gráfica Viscosidad-Temperatura de los combustibles analizados [21].....       | 51 |
| Figura 3-5: Gráfica $\ln \eta - 1/T$ de los combustibles analizados [21] .....            | 52 |
| Figura 3-6: Grafica POFF-DAG distintos biocombustibles.....                               | 56 |
| Figura 3-7: Gráfica esteres metílicos saturados-POFF.....                                 | 57 |
| Figura 3-8: Gráfica esteres metílicos saturados-CP .....                                  | 57 |
| Figura 3-9: Gráfica esteres metílicos saturados-PP .....                                  | 58 |
| Figura 3-10: Sistemas en posible contacto con el combustible.....                         | 59 |
| Figura 3-11: Compatibilidad con materiales metálicos [25] .....                           | 63 |
| Figura 4-1: Ebro Patrol de motor Perkins.....                                             | 66 |
| Figura 4-2: Nissan Patrol SD33.....                                                       | 66 |
| Figura 4-3. Nissan Patrol en competición .....                                            | 67 |
| Figura 4-4: Nissan Patrol ultimas unidades.....                                           | 68 |
| Figura 4-5: Nissan Patrol MC-4 .....                                                      | 69 |
| Figura 4-6: Nissan Patrol ML-6 .....                                                      | 70 |
| Figura 4-7: Motor Nissan RD28.....                                                        | 70 |
| Figura 4-8: Nissan Laurel.....                                                            | 71 |
| Figura 4-9: Nissan Patrol GR Y61 RD28ETi.....                                             | 72 |
| Figura 4-10: Sistema de Combustible RD28T simplificado .....                              | 75 |

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4-11: Tubos de Nylon NIOCO .....                                | 78 |
| Figura 4-12: Termostato Electroauto 90T0026 .....                      | 79 |
| Figura 4-13: Calentador de depósito .....                              | 79 |
| Figura 4-14: Parker Racor Thermoline™ In-Fuel-Line Heater500 12v ..... | 80 |
| Figura 4-15: Parker Racor Nomad™ Coolant Heat Exchanger 320HTR4T ..... | 80 |
| Figura 4-16: Calentador de filtro de combustible .....                 | 81 |
| Figura 4-17: Parker Racor Nomad™ Electric Heater 14257 .....           | 81 |
| Figura 4-18: Artic Fox Midranger™ & Linehauler™ I-705B .....           | 82 |
| Figura 5-1: Nissan Patrol Top-Line objeto del presente proyecto. ....  | 86 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 2-1: Componentes del aceite vegetal [16] .....                                                                                     | 33 |
| Tabla 2-2: Características del motor Volkswagen 1.6D [13] .....                                                                          | 35 |
| Tabla 2-3: Características del motor Cummins 5,9L [17] .....                                                                             | 36 |
| Tabla 2-4: Resultados experimentos Universidad de Missouri [13] .....                                                                    | 37 |
| Tabla 2-5: Características del motor Tractor 6.1L [14] .....                                                                             | 37 |
| Tabla 2-6: Resultados a máxima potencia [14] .....                                                                                       | 38 |
| Tabla 2-7: Resultados promedio [14] .....                                                                                                | 39 |
| Tabla 2-8: Características del motor UCLM [18] .....                                                                                     | 40 |
| Tabla 2-9: Características del motor NISSAN YD25DDTi [20] .....                                                                          | 41 |
| Tabla 3-1: Densidad de los combustibles analizados [21] .....                                                                            | 50 |
| Tabla 3-2: Viscosidad de los combustibles [21] .....                                                                                     | 52 |
| Tabla 3-3: Propiedades frías según porcentaje de biodiésel [22] .....                                                                    | 54 |
| Tabla 3-4: Biodiésel procedente de aceite de girasol [23] .....                                                                          | 56 |
| Tabla 3-5 Biodiésel procedente de aceite de oliva [23] .....                                                                             | 56 |
| Tabla 3-6 Biodiésel procedente de aceite de colza [23] .....                                                                             | 57 |
| Tabla 3-7: Compatibilidad con materiales plásticos [25] .....                                                                            | 61 |
| Tabla 3-8: Desgaste de materiales en contacto con aceite lubricante de motor usado con biodiésel respecto a usado con gasóleo [24] ..... | 64 |
| Tabla 4-1: Características técnicas motor Nissan RD28T [28] .....                                                                        | 73 |
| Tabla 4-2: Determinación del consumo medio .....                                                                                         | 74 |
| Tabla 4-3 Presupuesto para climas fríos .....                                                                                            | 82 |
| Tabla 4-4 Presupuesto para climas cálidos .....                                                                                          | 83 |



# 1 INTRODUCCIÓN: LA MECÁNICA DIESEL

## 1.1 Historia de los motores Diesel

Este tipo de motor fue diseñado por el ingeniero alemán Rudolf Christian Karl Diesel (1858-1913), que se dedicaba al estudio de motores de alto rendimiento térmico que funcionasen con combustibles alternativos.

Durante años Rudolf Christian Karl Diesel trabajó en la idea de un motor de combustión interna basado en los principios de la ignición sin chispa, por compresión. Entre el año 1893 y 1897 desarrolló el primer motor en el mundo con encendido por compresión. Este primer motor curiosamente funcionaba quemando aceite vegetal, concretamente aceite de palma o de cacahuete [1] . Posteriormente este motor adoptó el apellido de su inventor como nombre.

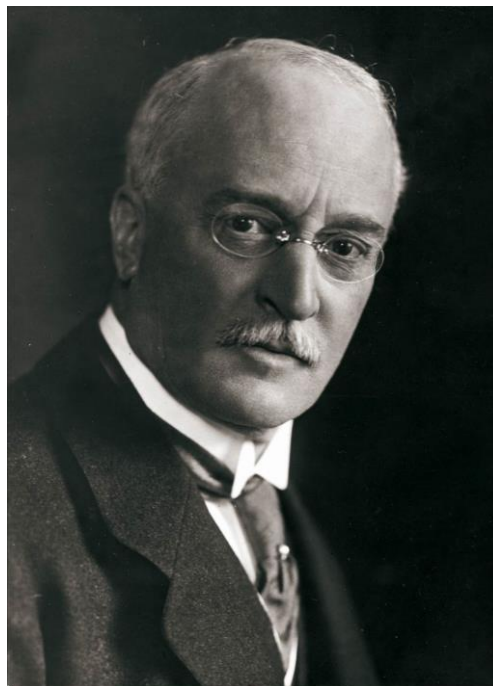


**Figura 1-1: Rudolf Christian Karl Diesel**

Fue ese mismo año 1897 cuando la firma MAN SE (empresa alemana dedicada a la producción de autobuses y camiones que aun en la actualidad sigue funcionando) produjo el primer motor Diesel en base a los estudios de Rudolf Christian Karl Diesel, pero utilizando para hacerlo funcionar un combustible poco volátil muy utilizado en esa época, el aceite liviano, mejor conocido como Fuel-Oil, y que es la base de lo que hoy conocemos como gasóleo y que es el combustible principal de los motores de ciclo Diesel.

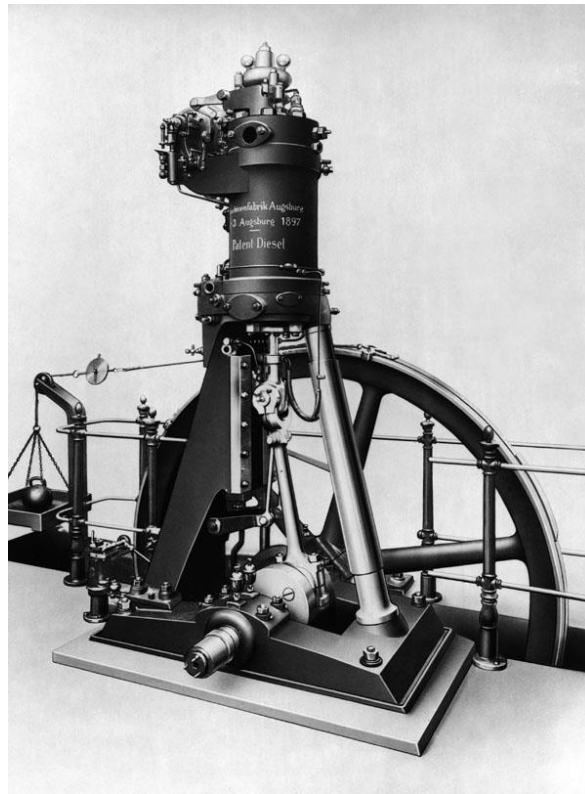


**Figura 1-2: Primer motor Diesel.**

Sin embargo este motor nunca fue instalado en los vehículos que existían en esa época debido a que para lograr la inyección del combustible, que era directa a la cámara de combustión, se necesitaba un compresor de aire extremadamente voluminoso para llevar a cabo una pulverización correcta del combustible. No obstante, su tamaño impedía su instalación en los vehículos, y además hacía de este motor un motor lento que a duras penas podía superar las 2000 revoluciones por minuto y siempre generando un alto ruido y vibraciones.

Este problema se solventó en el año 1927 cuando el ingeniero alemán Robert Bosch llevó a cabo una serie de innovaciones técnicas para la adaptación de este tipo de motores a los automóviles. El principal avance fue la inyección del combustible de tipo indirecta. Este sistema no precisaba de una presión de pulverización tan elevada porque al contar con una precámara de combustión en la que el combustible aumentaba considerablemente su temperatura, la combustión era más sencilla y mediante una pequeña bomba de inyección se sustituía al voluminoso compresor de aire que se utilizaba previamente para lograr la inyección de combustible, incrementándose además considerablemente el régimen de giro y reduciéndose el ruido y las vibraciones. Esta bomba fue perfeccionada permitiendo la instalación de motores Diesel en diversos vehículos, mayoritariamente los de uso industrial y de transporte medio-pesado. El uso en vehículos ligeros aun no resultaba rentable pues los motores Diesel seguían siendo considerablemente más pesados, voluminosos y proporcionalmente menos potentes que

los de ciclo Otto, no obstante Mercedes-Benz fue pionera sacando al mercado el modelo 260D en 1936, el primer automovil Diesel de la historia. [2]



**Figura 1-3: Primer vehículo Diesel**

Este sistema primigenio de bomba de inyección desarrollado por Bosch se denomina bomba de inyección en línea y a día de hoy ya no se utiliza, debido principalmente a que cuenta con un elemento de bombeo para cada uno de los cilindros del motor colocados en línea, por lo tanto sigue ocupando un significativo espacio en un motor de combustión interna, sobre todo en comparación con sistemas posteriores como la inyección por bomba rotativa o el common-rail. No obstante previamente a esto, el sistema de inyección en línea tendría un largo periodo de vida útil.

Fue ya en la década de los años 30 cuando los motores Diesel comenzaron a ser utilizados con fines militares, principalmente en automóviles de combate alemanes, submarinos y barcos. Tras la II Guerra Mundial, gracias a la evolución de la tecnología utilizada en los motores Diesel, éstos habían pasado a ser ampliamente utilizados en todo tipo de aplicaciones, sobre todo en vehículos pesados, agrícolas y trenes, gracias al bajo consumo y al alto par motor que caracteriza a este tipo de motor, sobre todo en comparación con su más directo rival, el motor de ciclo Otto que consume gasolina.



**Figura 1-4: Mercedes260D**

En la década de los setenta se produjo una revolución en este tipo de motores, ya al reducir su tamaño y su peso ahora era viable instalarlos en vehículos ligeros. Comenzó entonces su instalación masiva en automóviles, siendo los motores desarrollados por Volkswagen los más usados.

Conforme pasaba el tiempo la tecnología que se podía implementar a los motores Diesel iba avanzando, y en la década de los ochenta estos vehículos comenzaron a contar con sistemas de admisión forzada por turbocompresor, que otorgaron a estos motores unas mejores prestaciones y cualidades termodinámicas.

A finales de esta misma década, concretamente en el año 1986, se produce una nueva revolución en el mundo de los motores de ciclo Diesel cuando se reinventa la inyección directa. La novedad fue concebida dentro del Grupo Fiat, con la participación de sus subsidiarias Magneti Marelli, la filial del grupo especializada en componentes automovilísticos y electrónicos; Elasis y el Centro de Desarrollo Fiat. Recibió el nombre de Unijet y el proyecto fue posteriormente cedido a la empresa Robert Bosch A.G. de Alemania, para su fase final de desarrollo e industrialización. PSA Peugeot-Citroën, asociada con Mitsubishi, llevó adelante el desarrollo de un proyecto paralelo, con similares resultados. No obstante el primer vehículo comercializado con este sistema fue el Fiat Croma 1.9 TDiD.



**Figura 1-5: Fiat Croma 1.9TDiD**

En los sistemas utilizados con anterioridad, con cámara de precombustión, la alimentación de los inyectores del gasóleo es accionada por una bomba mecánica y la presión de inyección por lo tanto crece proporcionalmente al aumento del régimen de giro del motor, lo cual supone un límite físico para optimizar la combustión, y por lo tanto las prestaciones, el ruido y el consumo de combustible. En cambio con el sistema Unijet, la presión de inyección resulta independiente de la velocidad de rotación del motor, ya que la bomba de inyección genera presión por acumulación, controlándose la inyección por apertura y cierre del inyector y no desde la bomba de inyección. De ahí deriva la posibilidad de utilizar presiones muy altas y realizar una pulverización mucho más fina del combustible que facilite el calentamiento del mismo haciendo posible una fácil combustión sin necesidad de precámara. De esta manera se logra un menor nivel de sonoridad y consumo, además de mejores prestaciones al eliminarse las pérdidas térmicas producidas por la existencia de una precámara.

Es en la década de los noventa cuando tiene lugar el boom de los motores Diesel. La aparición de los primeros motores que contaban con gestión electrónica, desarrollada principalmente por Bosch, supuso un incremento de la popularidad de este tipo de mecánicas cuyo rendimiento se vio nuevamente incrementado. La electrónica ayudaba a controlar muchos de los sistemas del motor, como la inyección de combustible o el acelerador.

Sin embargo, este aumento de la popularidad suponía que cada vez eran mayores las exigencias planteadas a los motores a Diesel en términos de consumo de combustible, potencia y emisiones de escape principalmente. Para mejorar todos estos factores se requiere una buena preparación de la mezcla, así que los motores necesitaban sistemas de inyección aun a mayores presiones para lograr una pulverización muy refinada del combustible. También se debía evolucionar en el control de la cantidad inyectada de combustible y el momento exacto en el que debe de comenzar la inyección. Así es como con la colaboración de la empresa Robert Bosch AG, Volkswagen logró desarrollar, para sus motores TDI (Turbo Diesel Injection), una nueva tecnología llamada inyector-bomba, gestionada electrónicamente a través de válvulas electromagnéticas. Este sistema de inyección permite unas prestaciones más que dignas a los vehículos que lo llevan instalado, y además con unos consumos aún más ajustados.

No obstante esta no era una idea nueva, ya en el año 1905 el propio Rudolf Christian Karl Diesel había tenido una idea sobre una unidad de inyector-bomba que agrupara al inyector y a la bomba de inyección en un solo mecanismo, y así poder eliminar las tuberías de alta presión y conseguir una elevada presión de inyección. Sin embargo carecía de las posibilidades técnicas para poder llevar esta idea a la práctica en su época.

Una vez implementado el sistema de inyección inyector-bomba, los motores Diesel lograron cumplir con las exigencias planteadas, en lo que respecta a una alta potencia, en conjunto con unos consumos considerablemente bajos. Los motores Diesel estaban ya muy próximos en prestaciones a las mecánicas de gasolina, y con un consumo notablemente inferior, por lo que sus ventas comenzaron a superar ya a las de los motores de ciclo Otto incluso en automóviles pequeños.

[3] Poco después del inyector-bomba surgió el sistema de inyección denominado comercialmente como common-rail, o sistema de inyección directa de alta presión por conducto común. Al hablar de common-rail debemos nuevamente hacer referencia al grupo Fiat, ya que esta marca de automóviles fue la primera en aplicar este sistema de alimentación en los motores Diesel, tras haberlo desarrollado en el Centro de Desarrollo Fiat, nuevamente en colaboración con Magneti Marelli. Posteriormente la compañía alemana Bosch llevó a cabo el desarrollo de un proceso de fabricación en masa, industrializando el sistema.

En octubre de 1997 llegó al mercado el primer automóvil que utilizaba el sistema de inyección common rail, el Alfa Romeo 156 1.9 JTD, que aseguraba resultados en prestaciones y consumos impensables hasta ese momento. Los automóviles equipados con este sistema de inyección son increíblemente silenciosos, tienen una respuesta muy similar a la de los motores de gasolina y muestran una mejora media de las prestaciones del 12% respecto a los motores Diesel anteriores, además de una reducción de los consumos de combustible de un 15% y por ende la disminución de emisiones contaminantes al medio ambiente.



**Figura 1-6: Alfa Romeo 156 1.9JTD**

Es por esto que en el año 1998 se le otorgó el Premio "Paul Pietsch Preis" a Bosch y a Fiat por el sistema common-rail como innovación técnica para el futuro.

El éxito del Alfa Romeo 156 1.9 JTD fue inmediato, así que rápidamente Fiat empezó a implementar esta nueva tecnología en otros modelos. Así mismo muchas otras marcas comenzaron a adoptar este sistema. La técnica utilizada para el diseño del sistema common-rail es muy similar a la de la inyección multipunto de las mecánicas de gasolina, solo que propiamente adaptada a los requerimientos y las características de un motor Diesel de inyección directa. La diferencia fundamental entre los dos sistemas es la presión tan elevada que se alcanza en los motores Diesel con sistema common-rail. Esta presión suele ser del orden de 1400-1600 bar, mientras que los sistema de inyección de gasolina desarrollan presiones del orden de 5 bar.

El último avance de importancia dentro del mundo de las mecánicas de ciclo Diesel tuvo lugar en el año 2003, nuevamente de la mano de Fiat y Magneti Marelli, con el nacimiento del sistema Multijet. Este sistema patentado tiene como principio de funcionamiento que en cada ciclo de funcionamiento del motor haya más de una inyección de combustible en el cilindro y de distinta duración. En la actualidad hasta 8 inyecciones por ciclo se llevan a cabo.

Con todo esto, en nuestros días, algunas mecánicas de ciclo Diesel han conseguido superar a mecánicas tradicionales de gasolina en cuanto a par y potencia a igualdad de cilindrada. Y con un consumo tan bajo que en ocasiones es inferior a la mitad del consumo de un motor de similares prestaciones y ciclo Otto. Por este motivo hoy en día en España las ventas de automóviles Diesel son el 65% de las totales. [4]

Incluso en el mundo de la competición estas mecánicas han tenido su lugar. No solo en los campeonatos americanos de aceleración, donde el mayor par de las mecánicas Diesel las puede hacer superiores a los motores de gasolina, sino también en competiciones tradicionales en circuito cerrado la popularidad de las mecánicas Diesel crece año a año. Desde el año 2000 los motores Diesel cuentan con una reglamentación específica para poder participar en el Campeonato Europeo de Turismos, y es más,

en el año 2006, por primera vez un motor Diesel ganó a los motores de ciclo Otto. Fue en las 24 horas de Le Mans, donde el Audi R10 Diesel número 8 de Biela, Werner y Pirro completó 380 vueltas al legendario circuito francés, venciendo en la citada competición. [5]



Figura 1-7: Audi R10 TDI

## 1.2 Funcionamiento y subsistemas del motor Diesel

Los motores alternativos de combustión interna, tanto Diesel como Otto, comparten un sencillo principio de funcionamiento y una arquitectura similar.

Todos ellos se componen de un pistón que realiza un movimiento de vaivén en el interior de un cilindro. Dicho movimiento lineal alternativo se transforma mediante un mecanismo de biela-manivela en un movimiento circular, transmitido a un eje denominado cigüeñal, que será el utilizado para mover el mecanismo por el cual usamos el motor (movimiento de un generador, hélice, ruedas...).

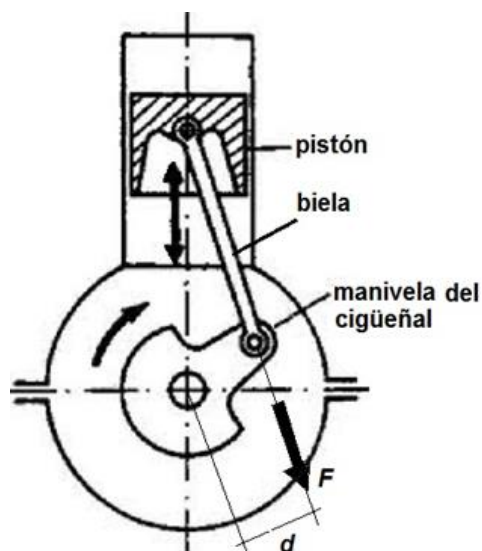


Figura 1-8: Esquema básico motor de combustión interna

El pistón realiza su movimiento de vaivén impulsado por la fuerza obtenida por la combustión de una mezcla de oxígeno y combustible en la cámara de combustión. Dicha cámara de combustión es el espacio libre entre la parte superior del cilindro, o culata, y la parte superior del pistón cuando este se encuentra en su posición más avanzada, es decir, el punto muerto superior (PMS).

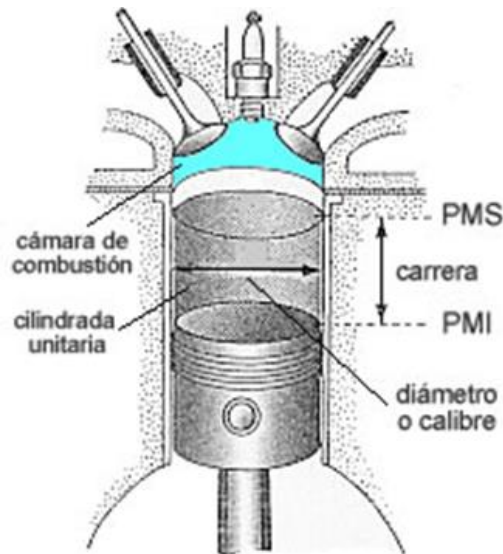


Figura 1-9: Cilindro y pistón

Los motores de combustión interna se dividen en dos tipos en función del método por el cual se produzca la ignición de la mezcla. Por un lado tenemos los motores de encendido provocado (MEP), en los que la mezcla de combustible y aire se enciende mediante la chispa de una Bujía. Este es el funcionamiento de las mecánicas de ciclo Otto, que comúnmente consumen gasolina. Por otro lado tenemos los motores de encendido por compresión (MEC), en los que se basa este trabajo y en los que la mezcla entra en ignición espontáneamente cuando se inyecta el combustible debido a las condiciones de extrema presión y temperatura existentes en la cámara de combustión en ese momento. Estas mecánicas son las conocidas como mecánicas de ciclo Diesel y habitualmente consumen gasóleo.

Centrándonos en el ciclo de trabajo de las mecánicas de tipo Diesel, comenzamos cuando el aire entra en la cámara de combustión (**admisión**). Únicamente entra aire, pues de entrar mezcla, como ocurre con la gasolina, sería imposible controlar el momento de explosión, que de esta manera sabemos que se produce inmediatamente después de la inyección del combustible. El aire es comprimido cuando el pistón avanza (**compresión**) y se produce la inyección del combustible sobre el aire comprimido explotando la mezcla en el momento de PMS. La fuerza de la explosión impulsa el pistón de nuevo en el sentido contrario haciendo girar el cigüeñal (**expansión**) y los residuos de la combustión son desechados (**escape**). Este ciclo de admisión, compresión, explosión y escape se repite continuamente permitiendo el funcionamiento del motor.

[6]En lo referente al análisis termodinámico los motores Diesel se comportan como máquinas de ciclo de gas abierto y combustión interna.

Consideramos que no existe ninguna irreversibilidad interna por lo que el ciclo ideal no implica fricción y en los procesos de expansión y de compresión no hay irreversibilidades ni intercambio de calor con el entorno. También se realiza la suposición de aire estándar, por lo que el fluido de trabajo es aire que circula de modo continuo en un circuito cerrado y se comporta como gas ideal. El proceso de combustión es

sustituido por un proceso de adición de calor desde una fuente externa y el proceso de escape es sustituido por una cesión de calor haciendo que el aire vuelva a su estado inicial.

Bajo estas consideraciones tenemos que el ciclo Diesel se estudia como un ciclo con 4 procesos, a saber:

1-2 Compresión isoentropica y adiabática:  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{v_{r2}}{v_{r1}} = \frac{1}{r}$

2-3 Calentamiento isobárico:  $q_{ent} = (h_3 - h_2)$

3-4 Expansión isoentropica y adiabática:  $\frac{v_4}{v_3} = \frac{v_{r4}}{v_{r3}} = \frac{r}{r_c}$

4-1 Enfriamiento isócoro:  $q_{sal} = (u_4 - u_1)$

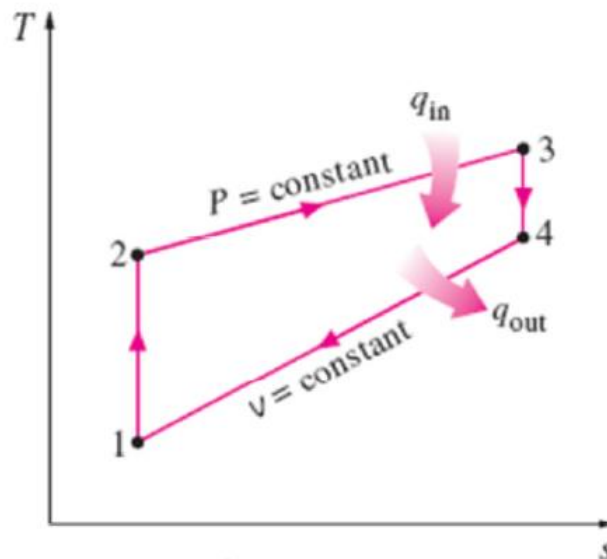


Figura 1-10: Ciclo Diesel

### 1.2.1 Los motores de 2 y de 4 tiempos

Comúnmente y para llevar a cabo el ciclo explicado, los motores alternativos de ciclo Diesel se dividen en dos tipos (aunque existen más variantes) en función de cuantas vueltas de cigüeñal, o subidas y bajadas de pistón, sean precisas para realizar el ciclo completo: los motores de 2 y de 4 tiempos

#### 1.2.1.1 Los motores de 4 tiempos

Los motores de 4 tiempos llevan a cabo el ciclo completo cada dos vueltas de cigüeñal, es decir, necesitan que el pistón avance y retroceda 2 veces. Así cuando baja la primera vez se produce la admisión, en el ascenso la compresión y al llegar al PMS la explosión. Posteriormente el pistón retrocede y vuelve a ascender empujando los gases de escape fuera de la cámara de combustión, y retrocede comenzando la admisión de nuevo.

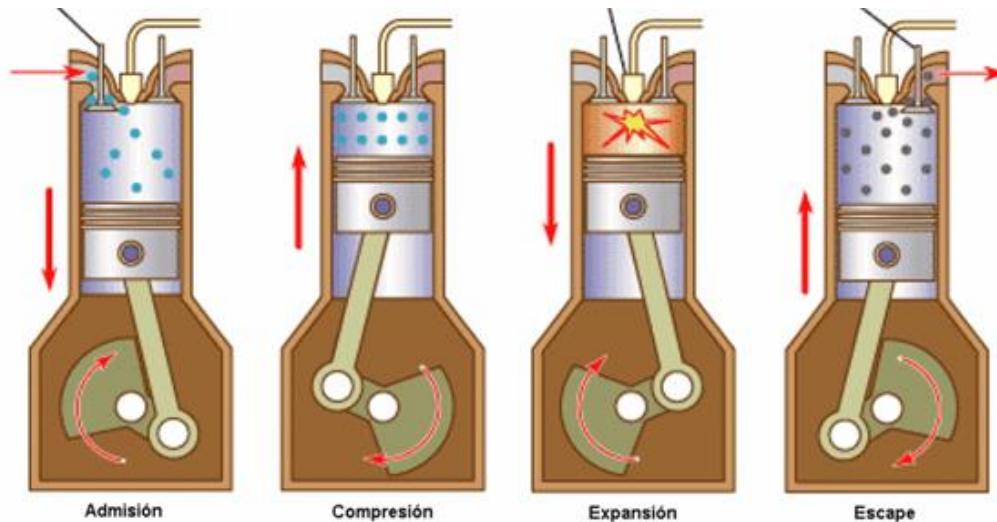


**Figura 1-11: Motor de 4 tiempos**

En el ciclo teórico de funcionamiento de este tipo de motor, la admisión se produce a presión atmosférica, las válvulas de admisión y escape se abren en los puntos extremos (PMI y PMS) y a cada tiempo le corresponde una carrera completa del émbolo o  $180^\circ$  de cigüeñal, completándose el proceso en  $720^\circ$ .

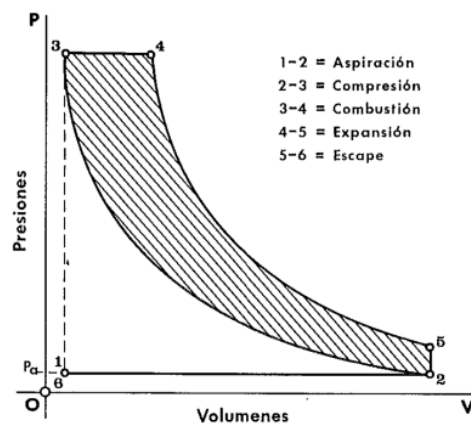


**Figura 1-12: Ciclo teórico motor Diesel**

En la práctica, no obstante, existe la denominada regulación del motor. Que busca ganar en eficiencia actuando sobre el funcionamiento de las válvulas con lo que se adelantan y retrasan ciertos procesos en función de las condiciones de funcionamiento del motor. De este modo lo habitual es que la válvula de admisión se abra unos  $15^\circ$  antes del PMS (hablando en ángulo de giro de cigüeñal) y se cierre  $20^\circ$  después del PMI. Por su parte el combustible comienza a inyectarse unos  $7^\circ$  antes del PMS para que se precaliente antes de explotar, y deja de inyectarse unos  $40^\circ$  después del PMS para prolongar dicha explosión. Por último la válvula de escape se abre ya  $42^\circ$  antes del PMI y se cierra unos  $12^\circ$  después del PMS a fin de permitir una mejor evacuación de gases y evitar la contrapresión. [6]

Si a esto añadimos que la admisión no se produce a presión atmosférica sino con una ligera depresión, ya que se lleva a cabo por el efecto de vacío que se deriva del retroceso del pistón, y que realmente los procesos ni son adiabáticos ni isócoros, pues obtenemos el ciclo real del motor de 4 tiempos.

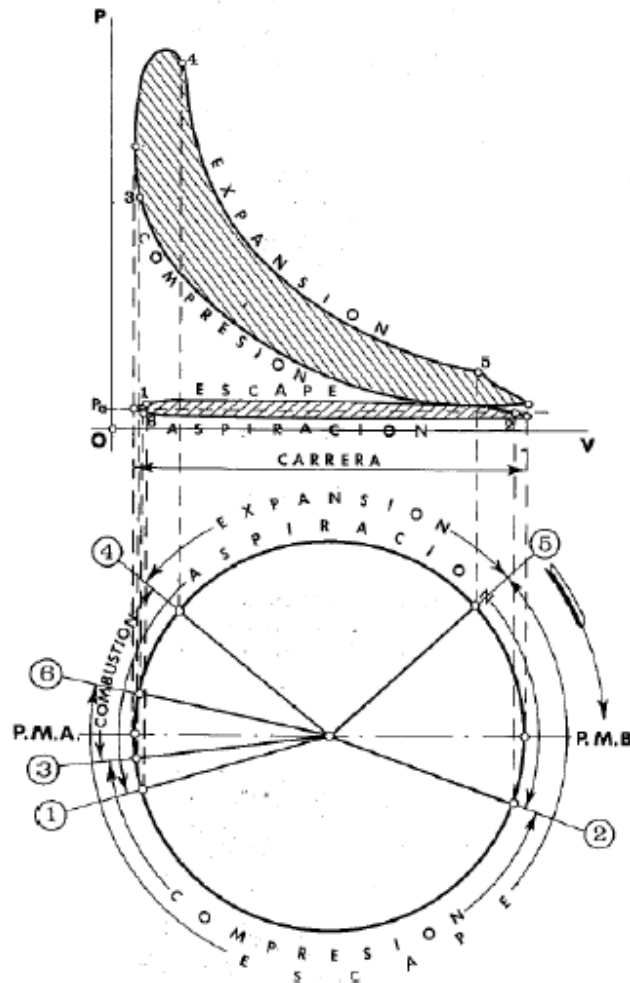


Figura 1-13: Ciclo real motor de 4 tiempos

### 1.2.1.2 Los motores de 2 tiempos.

Los motores de dos tiempos son aquellos que realizan todo el ciclo de combustión en cada vuelta de cigüeñal. Así la admisión se produce a la vez que el escape cuando el pistón está retrocediendo, y la compresión y la explosión cuando el cilindro avanza.

En este caso la regulación del motor se lleva a cabo en la fase de diseño si no dispone de válvulas, ya que como se verá más adelante, en este tipo de motores no es precisa su existencia. Esta modificación del esquema mecánico, hace que aunque el ciclo teórico del motor de 2 tiempos es idéntico en la teoría, en la práctica es diferente.

En el ciclo teórico la admisión y el escape se realizan en los PMS y PMI respectivamente y a los tiempos de compresión y expansión les corresponden  $180^\circ$  de giro cigüeñal o una carrera de pistón. Pero esto evidentemente no es así. En la práctica la admisión y el escape coinciden en el tiempo y la combustión se prolonga también a lo largo de la expansión, pues la inyección de combustible comienza unos  $7^\circ$  antes de PMS y finaliza unos  $40^\circ$  después de PMS [6]. Esto da lugar al ciclo real de los motores de 2 tiempos:

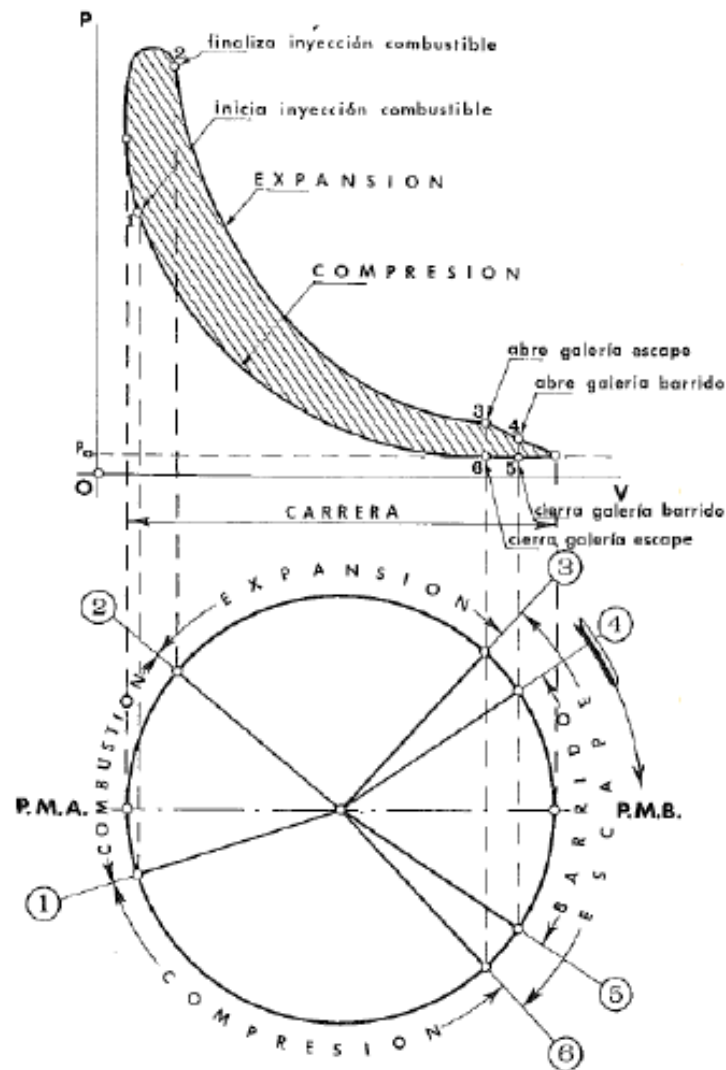


Figura 1-14: Ciclo real motor de 2 tiempos

### 1.2.2 Sistema de distribución

El sistema de distribución por su parte será el conjunto de piezas y mecanismos encargado de regular la entrada (aire) y salida (desechos de la combustión) de gases en la cámara de combustión de los motores de combustión interna.

#### 1.2.2.1 Motores sin sistema de distribución

Existen motores de 2 tiempos que carecen de sistema de distribución, ya que gracias a unos agujeros practicados en el cilindro denominados transfer es el pistón el que con su movimiento de vaivén tapa y destapa dichos transfer regulando la entrada y salida de gases.

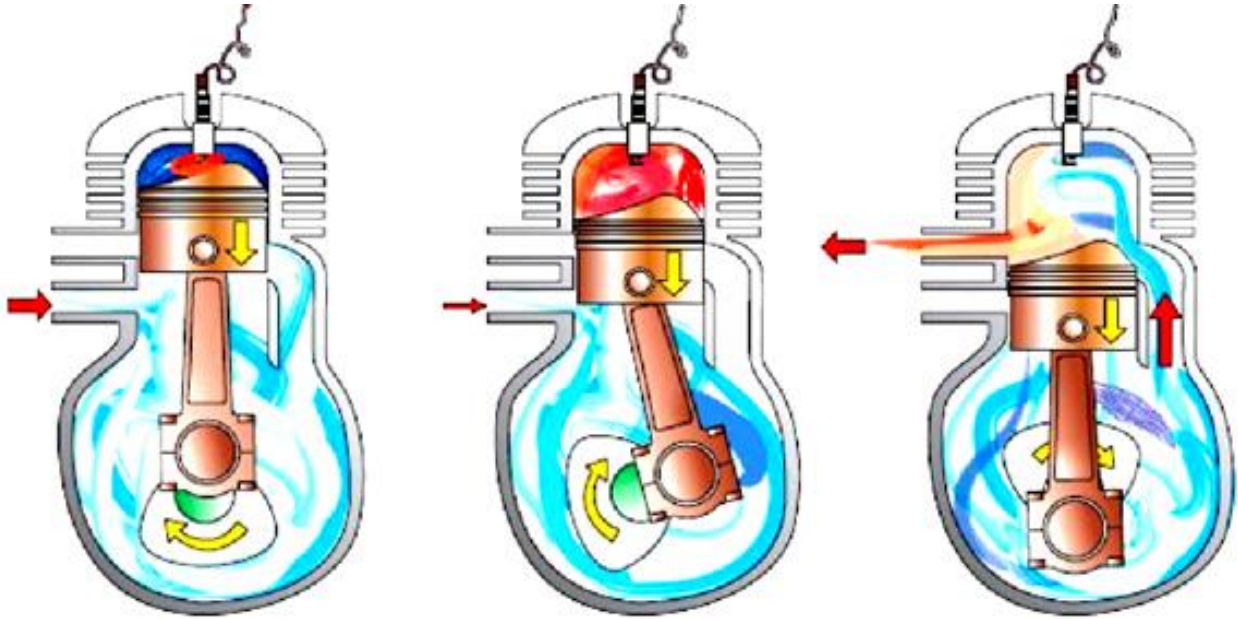


**Figura 1-15: Motor 2 tiempos sin sistema de distribución**

El pistón tras la explosión retrocede destapando el transfer de escape primero y luego el de admisión. Además el retroceso del pistón reduce el volumen del cárter, donde está alojado el aire, obligándolo a pasar a la cámara de combustión y desplazando los restantes gases de escape. Al ascender el pistón se tapan ambos transfer, y aumentara el volumen del cárter permitiendo (al generarse vacío, o bien por acción de una bomba o turbocompresor) que éste se llene de nuevo aire. Se produce la compresión y la explosión con los transfer cerrados y se reinicia el ciclo.

No obstante este sistema sufre un gran inconveniente: Al tener que pasar el aire por el cárter, este se mezcla con los vapores del aceite que lubrica la biela y el cigüeñal, pasando estos vapores irremediamente a la cámara de combustión, quemándose y produciendo elevadas emisiones contaminantes y carbonilla que perjudica al motor.

### **1.2.2.2 Los diferentes sistemas de distribución**

Para afrontar el problema antes explicado, los motores tanto de dos como de cuatro tiempos poseen un sistema de distribución con unas válvulas de admisión y escape situadas en la parte superior del cilindro (culata) que regulan la entrada y salida de gases del cilindro mediante una serie de mecanismos que las abren o cierran en los momentos oportunos. Pueden contar con una única válvula de admisión y otra de escape, o bien con 2 de admisión y 1 de escape, 2 de cada tipo, o incluso en casos más extraños, 3 de admisión y 2 de escape [6]. El sistema de distribución sincroniza perfectamente el movimiento del cigüeñal, y por tanto del pistón, con el de las válvulas, ya que un fallo en esta sincronización podría redundar en un funcionamiento deficiente (si la cámara de combustión no fuese estanca) o incluso en una grave avería, por ejemplo si el pistón golpea una válvula abierta al subir.

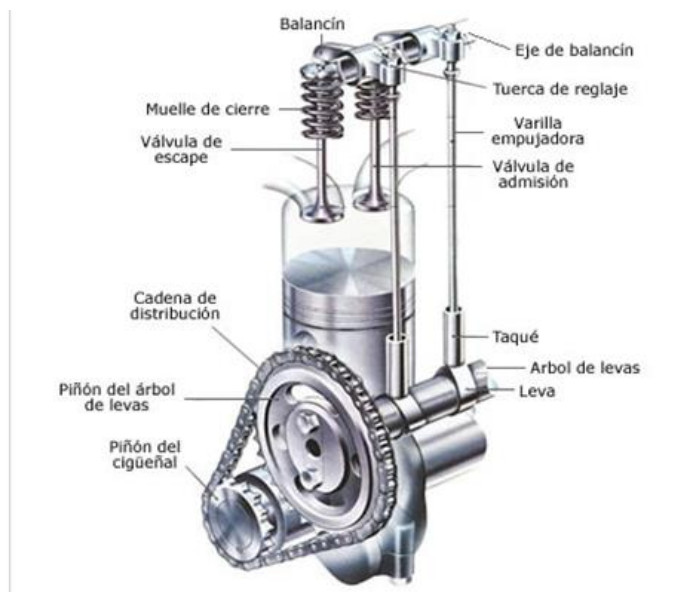


**Figura 1-16: Sistema OHV**

La única diferencia que encontraremos entre los motores de 2 y 4 tiempos en su sistema de distribución es que en los de 2 tiempos solo existe la válvula de escape, ya que la admisión se sigue realizando mediante transfer que el pistón abre y cierra en su recorrido. Esto es necesario porque en los motores de dos tiempos, como se ha visto, es el aire de admisión el que desplaza los gases de escape hacia fuera, por lo que la admisión tiene que realizarse en un punto del cilindro más retrasado que el escape, permitiendo que el aire empuje los gases de escape. Si la admisión se realizase en la culata, el aire de admisión empujaría los gases de escape hacia atrás y saldría por la válvula de escape, permaneciendo los gases de escape dentro de la cámara de combustión. Sin embargo, en los motores de 4 tiempos existen válvulas de admisión y de escape, ambas movidas por el sistema de distribución, ya que la admisión y el escape se realizan en momentos totalmente diferentes, sin que tengan que coincidir ambas válvulas abiertas.

En el sistema OHV (Over Head Valve) el árbol de levas es un eje con una serie de levas que al girar provocan el empuje de las válvulas y su apertura, el cierre de las mismas es responsabilidad de un muelle o sistema neumático. El sistema OHV se distingue por tener dicho árbol en el bloque motor y las válvula dispuestas en la culata. La transmisión de movimiento del cigüeñal al árbol de levas se hace directamente por medio de dos piñones o una cadena de corta longitud, necesitando de un mantenimiento casi nulo. La desventaja viene dada por el elevado número de elementos que componen este sistema para compensar la distancia que hay entre el árbol de levas y las válvulas, que produce holguras sobre todo a altas revoluciones, quedando el motor limitado en régimen de giro.

El sistema OHC (Over Head Camshaft), por su parte, se caracteriza por tener el árbol de levas en la culata, lo mismo que las válvulas. Es el sistema más utilizado actualmente. La ventaja de este sistema es que se reduce el número de elementos entre el árbol de levas y la válvula por lo que la apertura y cierre de las válvulas es más precisa, esto trae consigo que estos motores puedan alcanzar mayor número de revoluciones. Tiene la desventaja de complicar la transmisión de movimiento del cigüeñal al árbol de

levas, ya que, se necesitan correas o cadenas de distribución de mayor longitud, que tienen más desgaste, por lo que necesitan más mantenimiento. Dentro del sistema OHC tenemos dos variantes:

- El sistema SOHC (Single Over Head Camshaft) está compuesto por un solo árbol de levas que acciona las válvulas de escape en los motores de 2 tiempos, o las de admisión y escape mediante unos balancines en los 4 tiempos.

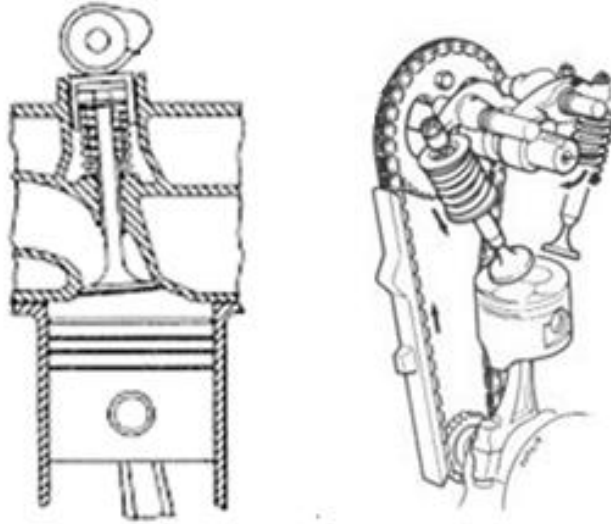


**Figura 1-17: Sistema SHOC 2 y 4 tiempos**

- El sistema DOHC (Double Over Head Camshaft) es en cambio un sistema exclusivo de las mecánicas de 4 tiempos que está compuesto por dos árboles de levas, uno acciona la válvulas de admisión y el otro las de escape. Este mecanismo es además el más utilizado en los sistemas de distribución variable, con los que cuentan algunos motores multiválvula, por el cual dependiendo del régimen de giro en que se encuentre el motor permiten la apertura de más o menos válvulas de admisión y escape.

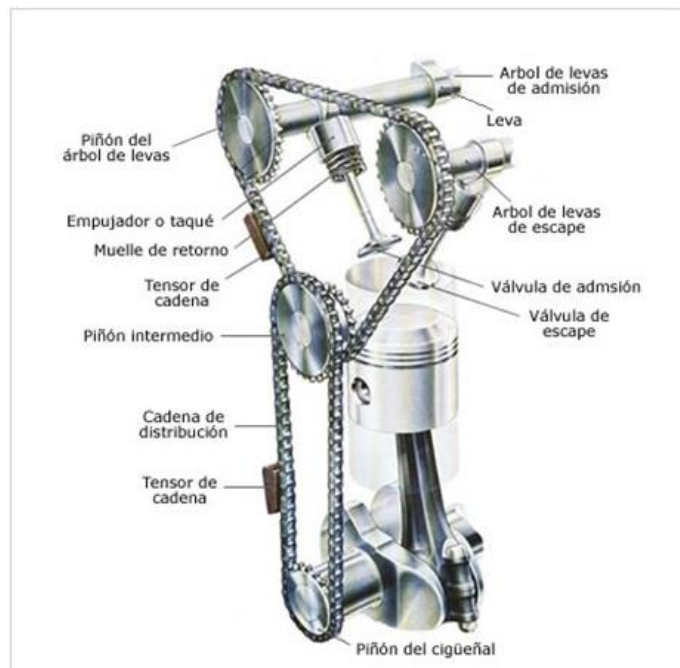


**Figura 1-18: Sistema DOCH**

### 1.2.3 El sistema de admisión

El sistema de Admisión será el encargado de proporcionar el oxígeno necesario para quemar el combustible a la cámara de combustión. Así, su principal cometido será formar un conducto que comunique el exterior y la cámara de combustión, evidentemente a través de un filtro que eliminará las impurezas q pudieran dañar el motor, para que el aire atmosférico pueda llegar a la cámara de combustión en condiciones de actuar como comburente.

#### 1.2.3.1 La admisión atmosférica

En los motores de 4 tiempos la admisión puede llevarse a cabo únicamente por la depresión que se produce en el cilindro cuando el pistón retrocede, ya q la cámara de combustión aumenta su tamaño y si la válvula de admisión está abierta se llenará con aire atmosférico que pasa a través de la misma. Es lo que se conoce como admisión atmosférica, ya que la presión a la que entra el aire en la cámara de combustión es muy próxima a la presión atmosférica.

Sin embargo, en los motores de dos tiempos, al coincidir la apertura de la válvula de escape y el transfer de admisión, no se produce un efecto de vacío en la cámara de combustión al retroceder el cilindro que fuerce la entrada de aire a la misma. Es por esto que se necesita un mecanismo que impulse el llenado de la cámara de combustión. Dicho mecanismo puede ser, como se ha explicado, el propio pistón al retroceder cuando el aire se encuentre previamente en el cárter, o una bomba de barrido.

En el caso de emplearse una bomba de baja presión o bomba de barrido, el motor se considerará atmosférico aunque no lo sea en el sentido estricto de la palabra. Esto es debido a que la presión de soplado de la bomba se sitúa en torno a 0.3 bares, muy baja en comparación a los 1.5 bares que suele proporcionar un turbocompresor en motores sobrealimentados.

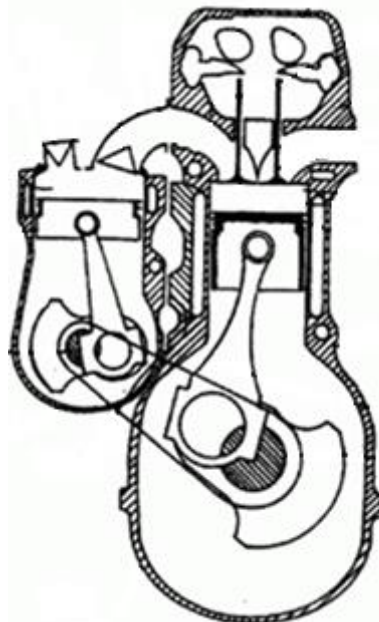


**Figura 1-19: Bomba de barrido**

Las bombas de barrido son movidas por el cigüeñal o el pistón mediante un mecanismo de engranajes, una correa o una cadena, y normalmente son alternativas o rotativas.

En el caso de tratarse de bombas alternativas normalmente son de doble efecto y aunque se acostumbra a montar una bomba por cilindro, lo normal es que descarguen a un colector común a fin de disminuir el efecto de las ondas de presión provocadas por el movimiento alternativo.

### 1.2.3.2 La sobrealimentación

La sobrealimentación por turbocompresor es un sistema ampliamente utilizado en las mecánicas Diesel. De hecho a día de hoy, la inmensa mayoría de motores Diesel que se construyen cuentan con “turbo”, nombre con el que popularmente se identifica a los motores sobrealimentados.

El sistema de turbocompresor permite un importante incremento de la potencia del motor sin necesidad de aumentar su tamaño y manteniendo un consumo de combustible contenido. Para hacernos a la idea, con un 5% de incremento de peso por la inclusión del turbocompresor, se puede lograr un incremento de potencia del 35% [6].

Inicialmente los primeros sistemas de sobrealimentación consistían en un compresor situado en el sistema de admisión y accionado por un motor eléctrico o por el propio cigüeñal. El compresor era capaz de proporcionar presión al aire de admisión por lo que la admisión ya no se llevaba a cabo por la depresión producida en el retroceso del pistón, sino que se llevaba a cabo por la presión que ejercía el compresor.

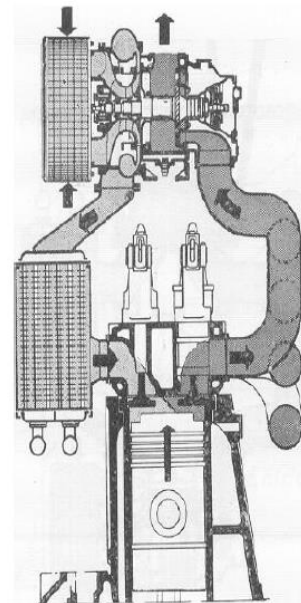


**Figura 1-20: Sistema de turbocompresor**

Sin embargo este sistema requería consumir energía suplementaria en el caso de emplear motor eléctrico, o implicaba una muy mala respuesta a bajas revoluciones si se movía con el cigüeñal. Por eso pronto nació el sistema de turbocompresor, en el cual una turbina accionada por los propios gases de escape es la que encargada de impulsar el compresor. Se obtenía así un mejor rendimiento, con menos consumo y un menor peso.

Posteriormente el sistema se fue mejorando con la inclusión de un enfriador, conocido como “intercooler”, encargado de enfriar el aire comprimido en el compresor antes de enviarlo a la cámara de combustión. Dicho enfriador es capaz de reducir la temperatura del aire comprimido a la mitad y producir un incremento de potencia de hasta el 15% [6].

El problema que se presentaba en la materia entonces era que a bajas revoluciones, la escasez de fuerza de los gases de escape impedían un correcto funcionamiento del sistema de turbo alimentación. Un turbocompresor más pequeño mitigaba el problema pero resultaba insuficiente cuando las revoluciones subían. El ultimo avance en materia de sobrealimentación fue el turbo de geometría variable. Este sistema consiste en utilizar un turbocompresor que tiene un sistema de álabes móviles que se abren y cierran haciendo variar la velocidad de los gases de escape al entrar en la turbina. A menor caudal de gases de escape más se cierra el paso entre los álabes provocando que los gases aumenten de velocidad al entrar en la turbina. A mayor caudal, necesitamos más paso y estos álabes se abren. Con esto tenemos una presión muy lineal en el aire a la salida del compresor en todo el régimen de trabajo del turbocompresor.

#### 1.2.4 El sistema de inyección

Como hemos comentado previamente, en la admisión de un motor Diesel se introduce únicamente aire en la cámara de combustión. El combustible es añadido posteriormente al tiempo de compresión mediante pulverización en el seno del aire comprimido. El sistema encargado de llevar a cabo esto es el sistema de inyección de combustible, que buscará que la mezcla sea lo más perfecta posible entre el combustible y el aire, para lo cual se precisa de una elevada presión de combustible y distribuirlo eficientemente dentro de la cámara de combustión.

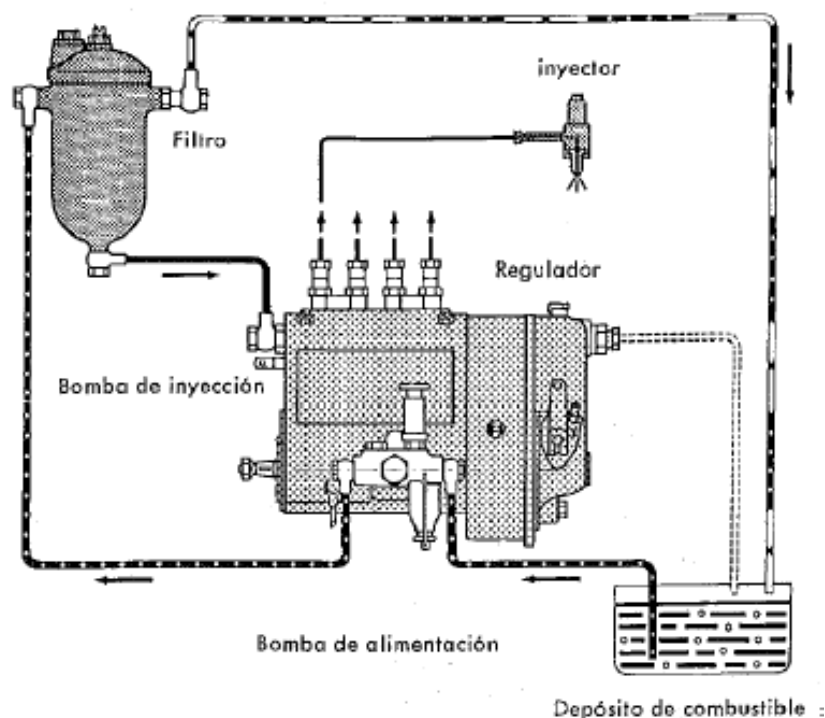


Figura 1-21: Sistema de inyección

Para ello el sistema de inyección de combustible cuenta con una serie de elementos: En primer lugar el depósito de combustible almacena el combustible destinado a hacer funcionar el motor. Está comunicado con una bomba de combustible que lo transporta hasta el sistema de inyección propiamente dicho, haciéndolo pasar previamente por un sistema de filtrado. Este sistema de filtrado retiene las impurezas del combustible y normalmente se basa en uno o más filtros con elementos intercambiables. El combustible entra después a la bomba de inyección, que es la encargada de darle la presión necesaria

al combustible y enviarlo a los inyectores que serán los encargados de introducir el combustible en la cámara de combustión.

Según el tipo de inyector utilizado hay tres maneras principales de clasificar al sistema de inyección: Inyección Mecánica, Inyección neumática e Inyección electrónica.

La Inyección neumática funciona de tal manera que el combustible es depositado en el inyector donde también se introduce aire proveniente de un compresor a alta presión. El aire a presión arrastra el combustible al interior de la cámara de combustión produciéndose una buena pulverización. La inclusión de un compresor permite que la bomba de inyección pueda ser de construcción sencilla, pues la presión del combustible no es tan relevante, no obstante, el compresor consume energía del motor, y el aire comprimido introducido a la cámara de combustión produce un ligero enfriamiento en el aire comprimido de combustión.

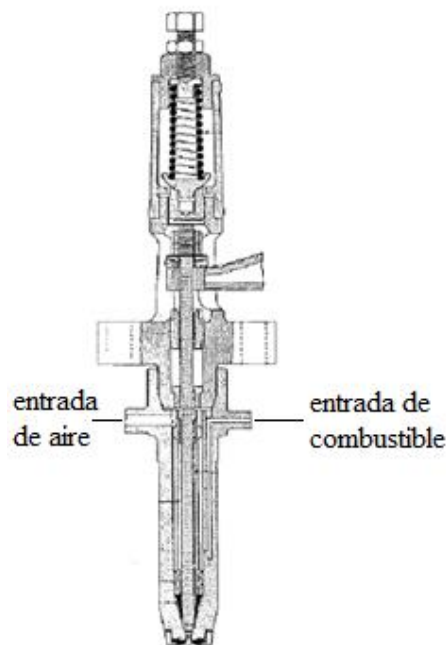


**Figura 1-22: Inyector neumático**

La inyección mecánica por su parte es el sistema más utilizado en la actualidad. Se subdivide en la inyección por bomba y la inyección por acumulación.

En el primer tipo se utilizan inyectores con tobera abierta, el cual siempre está abierto y carece de aguja inyectora. Cuando le llega presión de combustible de la bomba de inyección lleva a cabo la inyección, y cuando cede dicha presión la inyección finaliza.

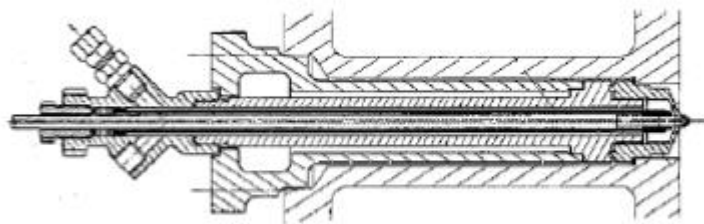


**Figura 1-23: Inyector de tobera abierta**

Por su parte la inyección por acumulación es la mas extendida. En este caso el inyector es de tobera cerrada y sí que cuenta con aguja inyectora. En este tipo de inyección la presión de la bomba de combustible es constante y es la aguja inyectora la que regula la inyección. Cuando la presión en el conducto del inyector supera la del muelle de la válvula de aguja el combustible entra en el cilindro. En el momento en el que cede la presión porque la acumulación de combustible ha bajado lo suficiente, la válvula se cierra y cesa la inyección.

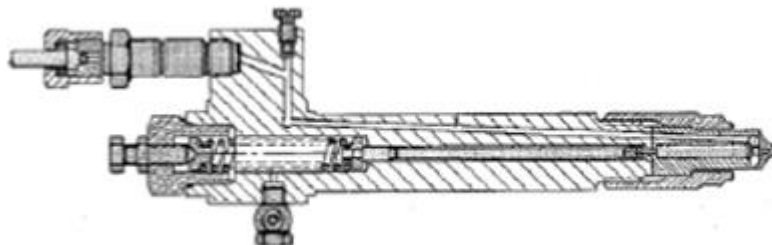


**Figura 1-24: Inyector de tobera cerrada**

Por último la inyección electrónica usa la electrónica para controlar el sistema de inyección en función de una serie de parámetros como son el regimen del motor o la posición del acelerador. Consta de una unidad electronica de control de los elementos y los inyectores suelen ser de solenoide o pizoelectricos. Los primeros funcionan de tal manera que la válvula del inyector se abre por la accion de un electroimán pequeño que se controla desde la unidad electrónica de control y se cierra normalmente por un muelle. Los inyectores pizoeléctricos por su parte son más precisos, y basan su funcionamiento en el uso de materiales pizoeléctricos que se dilatan al recibir corriente eléctrica, de esta manera se controla la inyección del combustible. La inyección electrónica es por tanto un gran avance en materia de control de la inyección y supone una reducción considerable en el consumo y las emisiones contaminantes, así como un aumento de las prestaciones.

Otra posible clasificación de los sistemas de inyección se fundamenta en la forma en que se produzca la inyección, esta se puede clasificar en dos tipos: directa o indirecta. En el primer caso la inyección del combustible se lleva a cabo directamente en la cámara de combustión, en el espacio entre la culata y el pistón. En ocasiones la cámara de combustión puede tener una forma adecuada que genere una turbulencia en el aire de combustión que permita que cuando se produzca la inyección, la difusión del combustible sea óptima.

Los sistemas de inyección indirecta llevan a cabo la inyección en una precámara que comunica con la cámara de combustión. En dicha precámara tiene lugar una débil combustión previa, pequeña explosión, que permite el calentamiento y la difusión del resto del combustible q no se ha quemado aun y que pasa a la cámara de combustión donde tiene lugar la combustión principal. En ocasiones esta cámara recibe el nombre de cámara de turbulencia cuando está diseñada para que el aire en compresión penetre en ella generando una turbulencia que arrastra el combustible fuera de dicha precámara optimizando la difusión.

Por último clasificaremos los sistemas de inyección en función del método de distribución del combustible entre los cilindros. En base a este principio tenemos tres tipos: El sistema de inyección por bomba rotativa, el inyector-bomba, y el sistema common-rail.

#### **1.2.4.1 La inyección por bomba rotativa**

En este tipo de sistema de inyección se tiene una bomba de inyección rotativa que se encarga de bombear el combustible hacia los cilindros del motor sin importar cuantos sean. Las cargas de combustible se distribuyen a cada cilindro por turno, en el orden correcto de encendido y a los intervalos de distribución requeridos, mediante un distribuidor rotativo que a su vez es el elemento de bombeo.

El diseño de la bomba rotativa viene determinado por el número de revoluciones, la potencia y el tipo de construcción del motor Diesel. Estas bombas tienen un regulador de revoluciones mecánico para regular el caudal de inyección, también cuentan con un regulador hidráulico para variar el avance de inyección. En bombas rotativas controladas electrónicamente se sustituyen los elementos mecánicos por actuadores electrónicos.

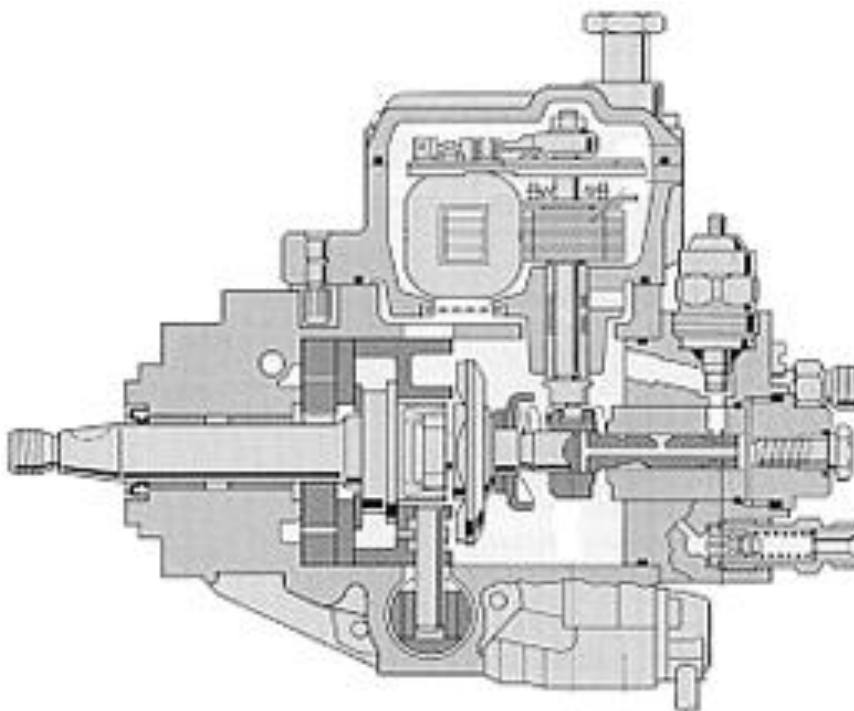


**Figura 1-25: Bomba de combustible rotativa**

Las bombas rotativas no disponen más que de un solo cilindro y un solo embolo de distribución, independientemente de cuantos cilindros del motor se vayan a alimentar [1]. La lumbrera de distribución se encarga del reparto del combustible entre las diferentes salidas correspondientes al número de cilindros del motor.

#### **1.2.4.2 El sistema de inyector-bomba**

Este sistema de inyección mejora ampliamente la forma de inyectar el combustible en los motores Diesel. En comparación a los motores que disponen de un sistema de inyección con bomba rotativa los motores que llevan un sistema inyector-bomba presentan ventajas como la baja sonoridad de la combustión, bajo consumo de combustible, bajas emisiones contaminantes y un mayor rendimiento. Estas ventajas se consiguen por medio de una alta presión de inyección que llega hasta los 2050 bares como máximo, una gestión electrónica precisa y un ciclo de preinyección [1].



**Figura 1-26: Inyector-bomba**

Como su nombre lo dice el inyector bomba es una unidad compuesta por una bomba de inyección con unidad de control y un inyector, agrupados en un solo componente. Cada cilindro del motor tiene asignado un inyector-bomba, de esta manera se logran eliminar las tuberías de alta presión que se utilizan en el sistema de inyección con bomba rotativa y facilitar el alcanzar presiones de inyección tan altas. Estas unidades son accionadas directamente por un empujador o indirectamente por un balancín mediante el árbol de levas del motor.

#### **1.2.4.3 El common-rail**

El sistema common-rail es una de las mayores innovaciones que sufrieron las mecánicas Diesel modernas. Se trata de un sistema de Inyección electrónica y directa cuyo principio de funcionamiento parte fundamentalmente del de la inyección multipunto de las mecánicas de gasolina pero con la diferencia fundamental de que la presión de trabajo es muy superior.

Bosch fue el principal desarrollador de esta tecnología que se basa en un conducto común o riel, que alimenta a todos los inyectores. Así la bomba de inyección ahora es una bomba de alta presión (de 200 a 2000 bares [7]), que puede tomar el combustible directamente del depósito (pasando por el filtro) o tener una bomba de alimentación auxiliar. Esta bomba de alta presión vierte el combustible en un conducto común al que están conectados todos los inyectores. La apertura y cierre de los inyectores se regula electrónicamente desde la ECU (Electronic Control Unit) y por tanto así se controla la inyección a cada cilindro de una manera precisa. Esta unidad también controla la presión de la bomba y la cantidad de combustible en el conducto común en función de los datos de sus sensores que le aportan información del rango de revoluciones, la carga del motor y temperatura del combustible y del motor entre otros parámetros.

La principal ventaja de este sistema es la optimización del funcionamiento del motor, pues garantiza que la presión de combustible es la misma en todos los inyectores, y que estos siempre disponen de presión suficiente de combustible para llevar a cabo la inyección. Además el control electrónico permite variar eficazmente el momento de la inyección y realizar varias inyecciones de combustible por ciclo en el seno del aire de combustión comprimido.

Todo esto redunda en un apreciable aumento de la suavidad del motor, una reducción del ruido, y una mejora sustancial de la combustión en el motor que implica reducción de consumo, aumento de prestaciones y disminución de las emisiones contaminantes [7].

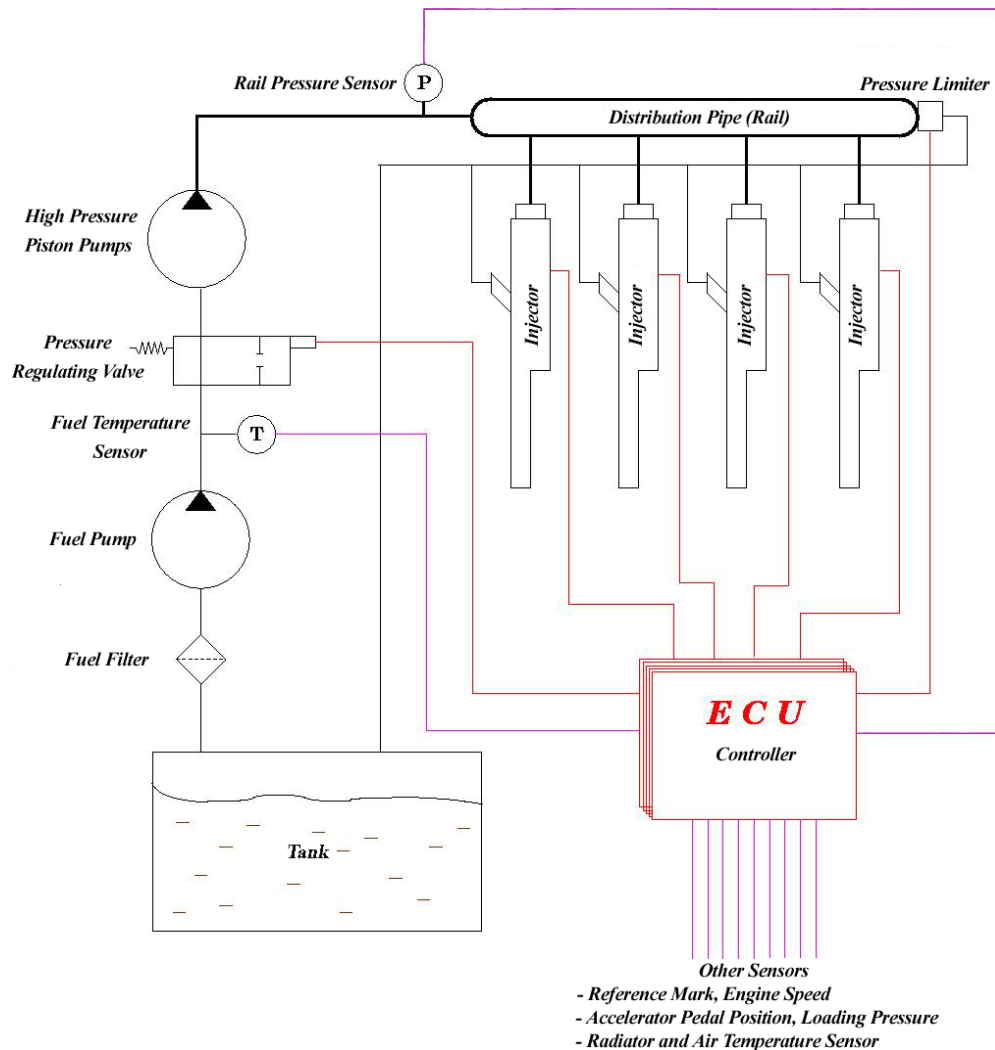


Figura 1-27: Esquema common-rail

### 1.2.5 El sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración, junto con el de lubricación, constituye uno de los sistemas auxiliares al motor más importantes.

El sistema de refrigeración busca extraer el calor necesario del motor para evitar el sobrecalentamiento de los materiales, que podría provocar dilataciones excesivas que conllevarían a fricción elevada e incluso gripado de diversas piezas, especialmente el conjunto cilindro-pistón.

Existen por tanto dos sistemas de refrigeración principales: Por aire y por agua. En la refrigeración por aire lo que se hace es labrar una serie de aletas en las paredes exteriores del cilindro y la culata a través de las cuales pasa el aire proveniente de un ventilador (sistema de aire forzado) o de la marcha del vehículo, evacuando el calor del motor. Este sistema ha tenido muy poca aplicación en los motores Diesel y a día de hoy está casi en desuso.

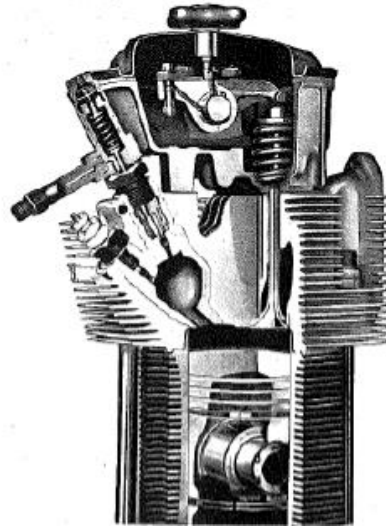


**Figura 1-28: Refrigeración por aire**

El sistema de refrigeración por agua es francamente más efectivo por la mayor capacidad calorífica de del gua respecto a la del aire (unas 6 veces superior [6]), que permite un enfriamiento más regular con temperatura más contaste. Además permite una adecuada refrigeración de piezas internas que con el aire no se refrigeran como pueden ser los pistones. Este sistema se fundamenta en el empleo de una bomba de refrigeración que mueve el agua por el interior del motor absorbiendo el calor de las piezas y enfriándolas.

El sistema de refrigeración por agua puede ser de circuito abierto o circuito cerrado. El primero de ellos, utilizado únicamente en motores marinos, utiliza directamente el agua del mar para la refrigeración. La absorbe del medio marino, la hace circular por el motor y la devuelve al mar.

Por su parte en el sistema de circuito cerrado, el agua o líquido refrigerante que enfría el motor circulando por su interior es siempre el mismo, y dicho agua o líquido refrigerante vierte el calor al medio en un intercambiador de calor.

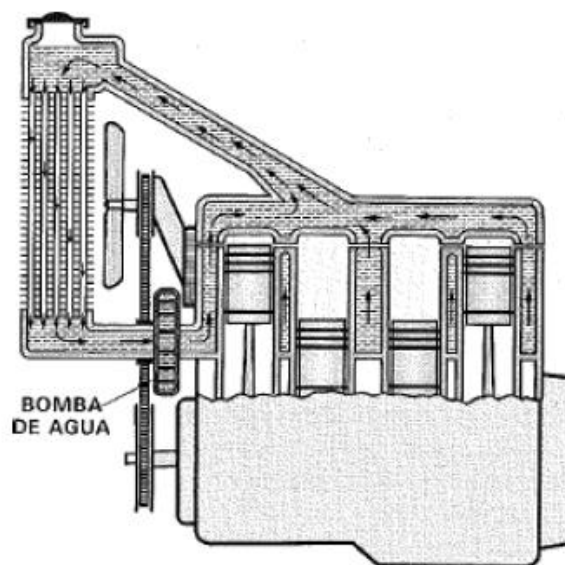


**Figura 1-29: Refrigeración por agua**

### 1.2.6 El sistema de lubricación

El sistema de lubricación busca disminuir la fricción entre la piezas móviles del motor, aumentando de esta manera el rendimiento y disminuyendo la temperatura y el desgaste de los elementos y sus apoyos.

La lubricación puede ser por salpicadura, donde simplemente se inunda el carter con aceite que baña el cigüeñal y las bielas, o bien por presión. En este segundo tipo hay un circuito de lubricación por el que circula el aceite bañando los diferentes elementos y es impulsado por una bomba de lubricación.

Además el circuito de lubricación cuenta con un filtro para evitar que las impurezas, fruto de las fricciones de los elementos bañados por el aceite, contaminen el aceite y se eleven los desgastes. También puede contar con un intercambiador de calor, o enfriador, que reduzca la temperatura del aceite, evitando que se vuelva excesivamente líquido, y permitiendo que pueda actuar como refrigerante.

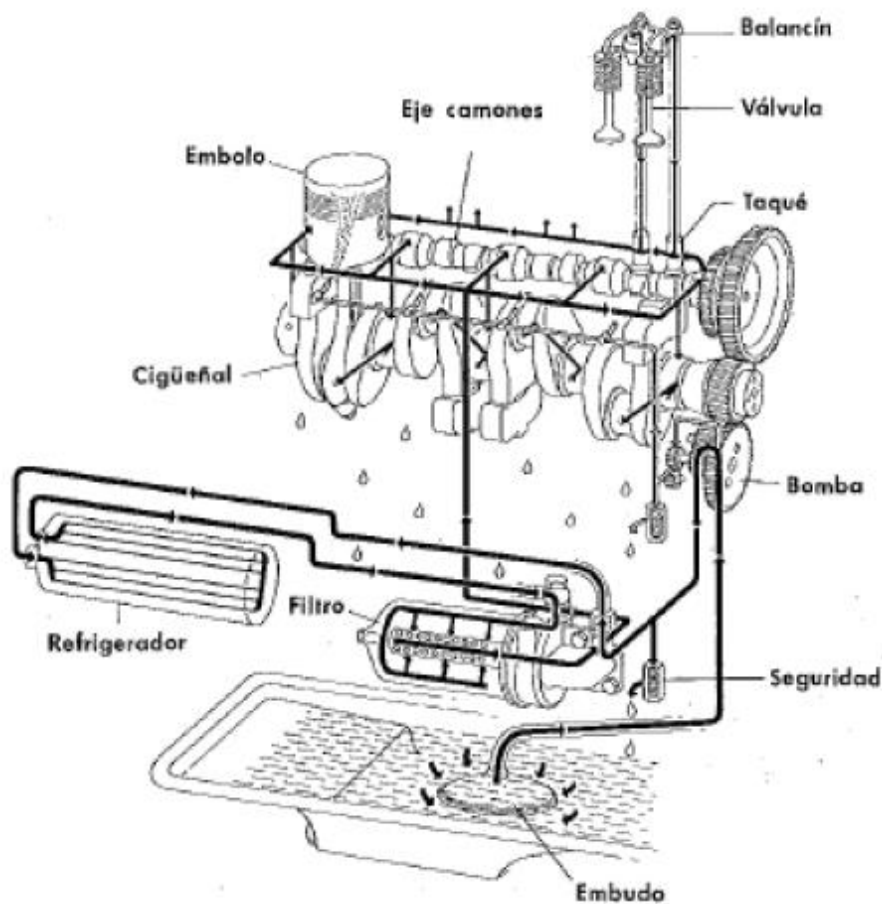


Figura 1-30: Sistema de lubricación

## 1.3 Gasóleo, combustible tradicional de las mecánicas de ciclo Diesel

El tipo de Mecánica sobre el que versa este trabajo está diseñado para funcionar consumiendo gasóleo, denominado así por su aplicación inicial para producir el gas de alumbrado. Se trata de una fuente de energía no renovable al provenir del petróleo. El tan conocido combustible es un aceite pesado de color blanco o verdoso y de densidad sobre  $832 \text{ kg/m}^3$  [8]. Está compuesto fundamentalmente por parafinas y es utilizado principalmente como combustible en motores Diesel y en calefacción. Su poder

calorífico es de 45,10 MJ/Kg [9]. Este hidrocarburo líquido hierve en el intervalo de temperaturas comprendido entre 180°C y 360 °C y se obtiene en su mayor parte mediante la destilación a presión atmosférica del petróleo bruto, dando lugar a lo que se conoce como gasóleo atmosférico [8]. También puede contener productos derivados de la destilación al vacío del residuo de destilación del gasóleo atmosférico, lo que se conoce como gasóleo vacuum. Por último hay tipos de gasóleo que proceden del craqueo de fracciones más pesadas del petróleo y se denominan gasóleos de craqueo [9].

El gasóleo se clasifica en 3 tipos [10]:

- **Gasóleo A:** Es el gasóleo de más calidad. El gasóleo A es el adecuado para motores de automoción. Está más refinado y contiene aditivos para evitar la solidificación de la parafina a bajas temperaturas. También tiene aditivos que aportan una serie de beneficios para el vehículo como son aumentar las prestaciones del motor, reducir el consumo y las emisiones contaminantes y proteger la bomba y el sistema de inyección, ya que también se encarga de mantener lubricados estos componentes.
- **Gasóleo B:** Este gasóleo se usa habitualmente para maquinaria agrícola, y embarcaciones. Contiene más cantidad de parafina que el anterior por lo que es más fácil que pueda solidificarse a bajas temperaturas. Además al estar menos filtrado y no contener los aditivos del gasóleo A, puede causar problemas de mantenimiento en los motores más modernos de los automóviles, más críticos en este aspecto que los tolerantes motores agrícolas o náuticos. Su uso en los turismos es además se considerado un delito de fraude ya que evita los impuestos del gasóleo A.
- **Gasóleo C:** Se trata del gasóleo más económico de los tres. Básicamente su función es generar calor ya que contiene muchas impurezas y un elevado nivel de parafina que aporte un alto nivel calorífico por lo que está destinado a ser utilizado en calderas de calefacción.



Figura 1-31: Tipos de Gasóleo

Sin embargo este combustible presenta dos grandes problemas aparte del mero hecho de ser un combustible finito. El primero de ellos es lo contaminante que es y el segundo es el precio.

A parte de las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de cualquier reacción química de combustión como la que se lleva a cabo en el interior de un motor Diesel, el gasóleo es especialmente contaminante debido a que contiene azufre entre sus componentes. El azufre se encuentra naturalmente en el petróleo y eliminarlo de entre los componentes del gasóleo requiere de un proceso de desulfuración basado en la

hidrodesintegración que resulta muy costoso [11]. De no llevarse a cabo este proceso, en la combustión del gasóleo que contiene compuesto sulfuroso se formarían óxidos de azufre, los cuales en presencia de humedad provocan un desgaste corrosivo de los aros de los pistones y las camisas de los cilindros [12].

Pero este no es el único problema que ocasiona la presencia de azufre en el combustible. El principal problema es la contaminación. La combustión del azufre da lugar a gran cantidad de sulfatos y óxidos de azufre, potenciales culpables de la lluvia ácida así como el agujero de la capa de ozono [13].

Esto ha conducido a que la mayoría de los gobiernos a promuevan normas de contención de las cantidades de azufre presentes en el gasóleo. La tendencia actual es que no superen el 0.05% [11]. Pero esto encarece terriblemente el proceso de refinamiento del combustible, por lo que, como se ha podido observar en los últimos años, aunque el petróleo ha fluctuado su precio, el gasóleo no sigue las fluctuaciones con exactitud, sino que más bien mantiene una tendencia al alza.

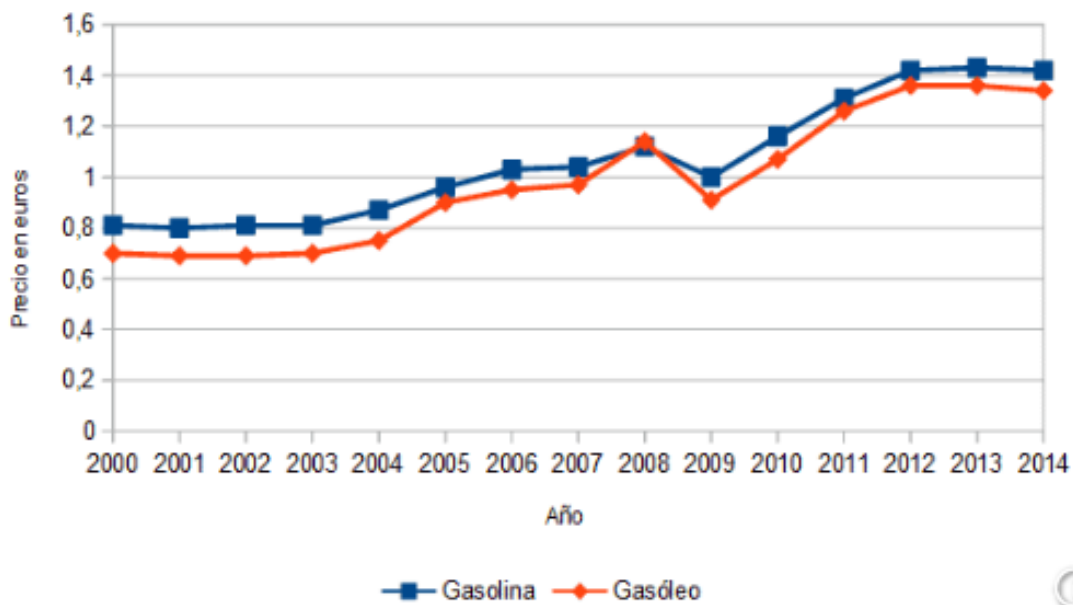


Figura 1-32: Evolución del precio del carburante en España. Ministerio de Industria.



Figura 1-33: Evolución del precio del barril de Brent. Ministerio de Industria.

En este marco económico y ambiental no es de extrañar el interés que desde hace unos años viene adquiriéndose por la búsqueda de fuentes de energía alternativas que sustituyan las actuales energías no renovables.

El principal problema que tiene la implantación de estas nuevas fuentes de energía es el inmenso coste que supone la renovación de todas las máquinas que operan utilizando los tradicionales combustibles no renovables. Por ejemplo para la automoción, la pila de hidrógeno o el vehículo eléctrico suponen soluciones muy eficaces al problema de los combustibles fósiles. Sin embargo el parque automovilístico mundial no está compuesto de vehículos que puedan consumir energía eléctrica fácilmente, sino que están preparados para los combustibles fósiles.

Sin embargo con muy pocas modificaciones sí que es posible adaptar los vehículos y en general las motorizaciones de ciclo Diesel al consumo de biodiésel.

Se reserva el termino biodiésel a un conjunto de combustibles oxigenados basados en ésteres de fuentes biológicas renovables como son los aceites vegetales, animales, reciclados y grasas usadas. Suele ser ampliamente utilizado mezclado con gasóleo tradicional. Por ello se ha elaborado una terminología general para los combustibles obtenidos mediante mezcla de biodiésel y gasóleo tradicional. Estas mezclas, conocidas popularmente como biodiésel aunque no lo sean de manera estricta por contener gasóleo, se clasifican con la letra B seguida de un número que indica el porcentaje de biodiésel en la mezcla. Así el biodiésel 100% puro se denominará B100, y una mezcla de 20% de biodiésel y 80% de gasóleo se denominará B20 [14].

Entre las ventajas más destacables de su empleo, los aceites vegetales provenientes de cultivos agrícolas no alteran el equilibrio de dióxido de carbono en la atmósfera. Además, la ausencia de azufre contribuye a que se puedan cumplir las estrictas metas impuestas en muchos países en cuanto a la emisión de sulfuros y óxidos de azufre. Sumadas a estas ventajas, se han medido reducciones significativas de componentes aromáticos en los gases de emisión de los motores que emplean aceites y metilesteres como combustibles. Por último se produce una importante ganancia en el balance energético entre producción y consumo [14].

#### **1.4 Objetivo del Trabajo y estructuración de la Memoria:**

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la viabilidad y las modificaciones que deben realizarse en un motor Diesel convencional para su funcionamiento con biodiésel puro o B100, ya sea transesterificado o no. Este es un combustible 100% renovable que permitiría desvincular el motor Diesel de la extracción de petróleo y reduciría las emisiones contaminantes a la atmósfera. Además y dado que dicho combustible puede ser obtenido partiendo de aceites usados que actualmente son desechados, se conseguiría reciclar dicho aceite y de abaratar de una manera considerable el uso de los motores de ciclo Diesel. No obstante el proceso al que deba ser sometido el aceite usado para permitir su uso como combustible queda fuera del alcance de este proyecto.

Tiene también como objetivo evaluar los costes de las modificaciones necesarias de manera aproximada realizando un estudio de las modificaciones a realizar sobre un vehículo real, en concreto un Nissan Patrol con motor RD28T de 1991. Se ha escogido este vehículo en concreto por sus amplias aplicaciones militares que todavía sigue desarrollando pese a su antigüedad.

Así, en un primer apartado se expondrá qué es el biodiésel, cómo se clasifica y cuáles han sido los experimentos y estudios más importantes que se han llevado a cabo acerca de su uso en las mecánicas

de ciclo Diesel. Se presentan también algunos de los resultados obtenidos tanto en emisiones como en ensayos de potencia.

Posteriormente se desarrollará la problemática del uso del biodiésel en este tipo de mecánicas. Explicando detalladamente qué problemas se presentan en la adaptación y qué soluciones se han estudiado a lo largo de la historia a fin de solventar dichos inconvenientes.

En un posterior apartado se encuentra el ejemplo de adaptación de un motor Diesel real al uso de biocombustible. Basándose, como se ha dicho, en la plataforma de un Nissan Patrol RD28T, se explicará detalladamente los elementos que se pueden utilizar para llevar a cabo la adaptación del motor al uso de biodiésel, incluyendo marcas y modelos exactos de las piezas a fin de elaborar un presupuesto que si bien no es exacto, sirva de referencia para futuras líneas de investigación que precisen llevar a cabo la modificación real.

Finalmente se establecerán una serie de conclusiones y se plantearán algunas de las múltiples líneas futuras de investigación al respecto de este proyecto, ya que realmente esta versado en un tema que aún necesita de una amplia investigación y desarrollo.



## 2 EL BIODIÉSEL

### 2.1 Situación actual de los biocombustibles

#### 2.1.1 Los biocombustibles.

Actualmente, la mayoría de los combustibles utilizados en todo el mundo como fuente de energía son de origen fósil. Su consumo, además va en aumento constante, debido en gran medida al crecimiento de la población y al desarrollo una sociedad cada vez más industrializada. Además las reservas mundiales de petróleo están en franco descenso, lo que sumado al gran impacto medioambiental que tiene su uso, sobre todo con el incremento de gases de efecto invernadero como el CO<sub>2</sub> y otros que destruyen la capa de ozono como el SO<sub>2</sub>; promueven la búsqueda y el desarrollo de nuevas fuentes de energía respetuosas con el medio ambiente y que sean renovables. Una de estas fuentes de energía es la de los denominados “combustibles limpios” o biocombustibles.

Los biocombustibles son alcoholes, éteres, ésteres y otros compuestos químicos, producidos a partir de biomasa como son por ejemplo las plantas herbáceas y leñosas, residuos de la agricultura y actividad forestal, y sobre todo una gran cantidad de desechos industriales orgánicos, como los desperdicios de la industria alimenticia [15].



Figura 2-1: Surtidor de biodiésel

En realidad el término biomasa hace realmente referencia a toda materia que tiene su origen relacionado directamente con los productos obtenidos a través de la fotosíntesis. La fotosíntesis es un proceso que llevan a cabo la mayoría de las especies vegetales para crear azúcares partiendo de sustancias simples como el agua y el dióxido de carbono, utilizando como fuente de energía la energía solar. Almacenan después esta energía en forma de moléculas de sustancias como la glucosa, el almidón, o el aceite, que son las que se pueden utilizar para la sintetización de biocombustibles. Entre los biocombustibles más conocidos podemos incluir el bioetanol, el biodiésel o el biometanol, aunque realmente los dos productos más desarrollados y empleados en motores de combustión interna de esta clase de combustibles son el bioetanol y el biodiésel. El primero es un alcohol destinado esencialmente a mecánicas de ciclo Otto, pero en Europa tiene especial interés el segundo, destinado a las mecánicas de ciclo Diesel, debido a la creciente demanda de gasóleo que se está experimentando en el viejo continente estos últimos años, en detrimento de la demanda de gasolina. De hecho, el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea (UE), aprobaron la Directiva 2009/28/CE, por la que se establece como objetivo que para el año 2020 se haya alcanzado un 10% de combustibles de origen renovable respecto al total de combustible utilizado en Europa para el transporte, que actualmente es gasóleo de origen fósil en prácticamente la totalidad de los casos [16].

El biodiésel es un combustible producido a partir de materias de base renovable, principalmente distintas fuentes de aceite vegetal tales como soja, colza, girasol o maní. Aunque también se puede obtener a partir de grasas animales. Se caracteriza principalmente porque se puede usar en los motores Diesel sin grandes modificaciones. Además este combustible está constituido químicamente por ésteres de alquilo, de metilo y de etilo, con cadenas largas de ácidos grasos. Estas cadenas, al estar oxigenadas, le otorgan al motor una combustión mucho más limpia que con un combustible de origen fósil tradicional [15].

El biodiésel se encuentra registrado como combustible y como aditivo para combustibles en la Agencia de Protección del Medioambiente (Environment Protection Agency, EPA) de los Estados Unidos de América, ya que puede ser utilizado en estado puro o B100, conocido como “gasoil verde”, o en mezclas de diferentes concentraciones con el gasóleo de origen petrolífero. La mezcla más utilizada y conocida como biodiésel en nuestros días es al 20%, es decir 20 partes de éter vegetal y 80 partes de gasóleo. Si bien se utiliza como aditivo en el gasóleo comercial de manera bastante habitual por sus buenas propiedades lubricantes, eso sí, en concentraciones que normalmente no superan el 5% [15].

### *2.1.2 Clasificación de los biocombustibles*

Atendiendo a la materia prima y tecnología utilizada para su producción, los biocombustibles pueden clasificarse por generaciones [16]:

- Primera generación: La materia prima utilizada está formada por las partes alimenticias de las plantas, que poseen un alto contenido en almidón, azúcares y aceites. Algunos ejemplos de materias primas podrían ser el aceite de girasol, el aceite de palma o el de ricino. Para la producción de estos biocombustibles se utiliza tecnología convencional como es la fermentación, o la digestión anaerobia. Pueden ser sometidos a un proceso de transesterificación que elimina parte de los ésteres, y aunque es un proceso costoso y laborioso, mejora sustancialmente las propiedades del biocombustible para ser utilizado en motores Diesel con respecto a un tipo de biodiésel compuesto simplemente de aceite vegetal puro.

- Segunda generación: En este caso, la materia prima que se usa está formada por residuos agrícolas y forestales compuestos principalmente por celulosa, tales como hojas y ramas secas de árboles, bagazo de la caña de azúcar o paja de trigo, entre otros. La tecnología utilizada en este caso es algo más compleja que la empleada en los biocombustibles de primera generación, siendo algunos ejemplos de ella el proceso Fischer-Tropsch o la sacarificación-fermentación.
- Tercera generación: Como materia prima se utilizan materiales vegetales no alimenticios de crecimiento rápido, con una alta densidad energética almacenada en sus componentes químicos. Proviene de los denominados también como cultivos energéticos. Algunos ejemplos son pastos perennes, micro algas, o cultivos específicos. La tecnología para la obtención de biocombustibles a partir de estas materias primas todavía se encuentra en fase de desarrollo, logrando producirse pero a pequeña escala.

### 2.1.3 Aceites Vegetales como materia prima para la obtención de biodiésel.

Los aceites vegetales están compuestos principalmente de una mezcla de triglicéridos, ésteres de la glicerina y ácidos grasos, por lo que son una materia prima ideal para la obtención de biocombustibles por su alto rendimiento energético. La siguiente tabla muestra una relación de la proporción habitual de los componentes de un aceite vegetal.

| Compuesto                | % en Masa |
|--------------------------|-----------|
| Tri-/Di-/Mono-Glicéridos | 95-98%    |
| Ácidos Grasos Libres     | 0.1-3%    |
| Fosfolípidos             | 0.1-3%    |
| Insaponificables         | 0.2-2%    |

Tabla 2-1: Componentes del aceite vegetal [16]

Las cadenas de los ácidos grasos de los triglicéridos, cuya estructura tipo se muestra en la figura siguiente, pueden estar saturadas, mono-insaturadas o poli-insaturadas.

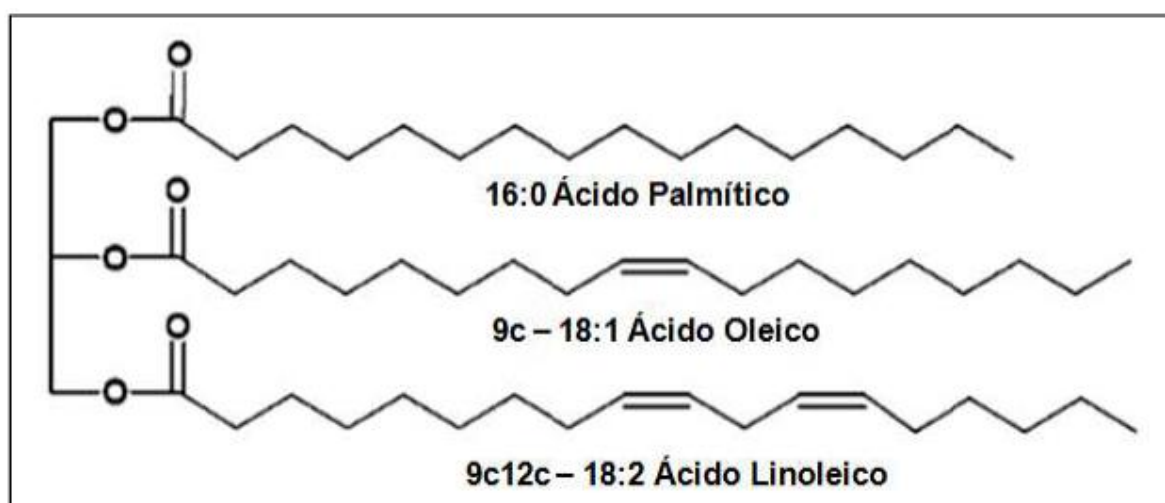


Figura 2-2: Cadenas de ácidos grasos triglicéridos [16]

Estos ácidos grasos que forman las cadenas de los triglicéridos, pueden clasificarse dependiendo de la longitud y del grado de insaturación de las mismas, y son las que hacen de los aceites vegetales materias primas muy propicias para la obtención de biocombustibles.

Son muchos los tipos de aceites vegetales que pueden utilizarse para la obtención de biodiésel, tanto aceites comestibles de los que son ejemplo el aceite de girasol, el aceite de oliva o el aceite de soja; como aceites no comestibles tales como el aceite vegetal usado de fritura, el aceite de Jatrofa, o el aceite de colza.

Sin embargo, el encarecimiento de los alimentos asociado a la utilización de aceites de uso alimentario para la producción de biocombustibles ha tenido una gran repercusión social, dando lugar a que en los últimos años se debatiera ampliamente el efecto que tendría esta práctica en la sociedad actual. Resulta polémico porque muchas áreas destinadas al cultivo alimentario deberían destinarse al cultivo energético, lo que encarecería los productos de los primeros. Esto ha conducido a que se reduzca el uso de aceites alimenticios como materia prima para la producción de biocombustibles. Incluso en muchos países, incluyendo España, es ilegal tanto la producción de biodiésel derivado de aceites de uso alimentario, como el uso de dicho aceite para cualquier fin que no sea el alimentario.

Los aceites no comestibles, en cambio, se han convertido en una buena alternativa como materia prima, ya que mediante su uso no sólo se elimina un residuo contaminante para el medio ambiente, sino que se obtiene un producto biocombustible de alto valor añadido complementario al gasóleo tradicional que es, como se ha explicado, el combustible utilizado en los actuales motores Diesel [16].

## **2.2 El biodiésel como combustible de los motores de ciclo Diesel.**

La idea de utilizar productos vegetales en el corazón mismo del motor Diesel no es ninguna novedad. Ya en sus orígenes, el creador del motor de encendido por compresión, o motor Diesel, el propio Rudolf Christian Karl Diesel, diseñó su más conocida creación para que consumiera aceite de origen vegetal, como así demostró en la exposición de París de 1900, cuando utilizó aceite de cacahuete en la presentación del motor Diesel para hacer funcionar el prototipo [15]. Esto nos indica, que las raíces de este asunto se remontan más de un centenar de años atrás.

Durante estos más de cien años, y fundamentalmente, en la segunda mitad del siglo veinte, se han sucedido un sin fin de investigaciones y experiencias por la búsqueda de combustibles de origen vegetal para los motores de ciclo Diesel. Sin embargo ha sido en los últimos años cuando se ha dado un significativo impulso a estos proyectos.

### ***2.2.1 El experimento de Volkswagen***

El objetivo de la prueba fue investigar el comportamiento del biodiésel en motores Diesel existentes, utilizando vehículos y motores de producción en serie, que no estuvieran originalmente diseñados para consumir otra sustancia que no fuera gasóleo. Las pruebas fueron realizadas a principios de los años ochenta con biodiésel puro en motores Diesel Volkswagen 1,6D que contaban con mecanismos de inyección indirecta. Se realizaron los experimentos en banco de pruebas y en unidades del motor instaladas tanto en un turismo Volkswagen Passat como en una furgoneta Volkswagen T2. Los detalles del motor son los siguientes:

**VOLKSWAGEN 1.6D**

|                        |                                                      |
|------------------------|------------------------------------------------------|
| Nº de Cilindros        | 4 cilindros en Línea                                 |
| Inyección              | Indirecta con cámara de turbulencia y Bomba Rotativa |
| Cilindrada             | 1588 cc                                              |
| Relación de compresión | 23:1                                                 |
| Diámetro x Carrera     | 76.5mm x 86.4mm                                      |

**Tabla 2-2: Características del motor Volkswagen 1.6D [13]**

Volkswagen realizó rigurosas pruebas utilizando su programa de pruebas de durabilidad para motores Diesel en vehículos comerciales ligeros. Sometió al motor a más de 1.400 horas de funcionamiento con biodiésel puro a fin de comprobar los máximos cambios posibles con respecto al funcionamiento con el gasóleo existente en la época. En el ciclo de pruebas se contemplaron una de 1.000 horas de funcionamiento a máxima potencia y otra de 300 horas a par máximo, pero no fueron las únicas.

Después de estas pruebas el motor fue desarmado para examinar y medir desgastes. El desgaste de cojinetes, anillos de pistón, camisas de cilindros y asientos de válvulas permanecieron dentro de las especificaciones de Volkswagen y por lo tanto, son consideradas como correspondientes a un desgaste en condiciones normales.



**Figura 2-3: VW Passat 1.6D**

Similares resultados se obtuvieron en las pruebas de durabilidad realizadas años más tarde por Volkswagen, esta vez sobre motores de inyección directa. La única diferencia que se tomó en consideración respecto al uso de gasóleo convencional fue la comprobación de una ligera mayor dilución del aceite lubricante del motor al utilizar el biodiésel puro. De todas formas, esta dilución no tiene efectos sobre la capacidad de lubricación del aceite del motor salvo que se diera el caso de llegar al punto donde el antioxidante del aceite lubricante es totalmente utilizado y se produce el espesamiento del aceite. Este espesamiento se produce más rápido que con el gasóleo derivado del petróleo debido a la fracción no saturada de la cadena de ácidos grasos que se encuentran en el biodiésel.

No obstante, a lo largo de los años las tolerancias internas de los motores se han reducido drásticamente, principalmente por requerimiento de las normativas anticontaminación. Esto implica que

el combustible que es capaz de entrar en contacto con el aceite de lubricación del motor a través de las camisas de los cilindros y los cojinetes de las válvulas también es mucho menor, por lo que los problemas de dilución ya no son de consideración, como demuestra la garantía total que da Volkswagen a sus motores TDI aunque hayan sido utilizados con biodiésel [13].

### *2.2.2 El experimento de la Universidad de Missouri*

Entre los años 1994 y 1995, la Universidad de Missouri completó una prueba que consistía en obligar a operar con combustible de origen vegetal puro (B100) y durante 160.000 km. al motor Cummins de una camioneta Dodge RAM de 1991. Se pueden observar los datos de la mecánica en cuestión:

#### **CUMMINS 5,9L**

|                        |                                                       |
|------------------------|-------------------------------------------------------|
| Nº de Cilindros        | 6 cilindros en Línea. 2 válvulas por cilindro.        |
| Alimentación           | Inyección directa con Bomba Rotativa. Turbocompresor. |
| Cilindrada             | 5900 cc                                               |
| Relación de compresión | 17:1                                                  |
| Diámetro x Carrera     | 102.1mm x 119.8mm                                     |

**Tabla 2-3: Características del motor Cummins 5,9L [17]**



**Figura 2-4: Dodge RAM 5.9 Cummins Diesel**

El desarme de este motor por parte de Cummins en colaboración con la universidad demostró el bajo desgaste y la excelente durabilidad del mismo siendo posiblemente menor que con gasóleo convencional.

Esto se atribuye a la alta lubricidad de del biodiésel, que disminuye la presencia de partículas de metal y carbón en el interior del motor, lo que disminuye el desgaste de las piezas y aumenta la vida útil de la mecánica. No olvidemos que todas las piezas móviles del circuito de alimentación de combustible se lubrican con el propio combustible.

Además, las investigaciones de la Universidad de Missouri obtuvieron datos acerca de los niveles de contaminación y de potencia tanto con biodiésel como con gasóleo convencional de bajos niveles de azufre, o sea el gasóleo comercial actual.

| 02 Febrero 1994     |        |                |            | 01 Mayo 1995 |                |            |
|---------------------|--------|----------------|------------|--------------|----------------|------------|
| VARIABLE            | DIESEL | BIODIÉSEL B100 | %VARIACION | DIESEL       | BIODIÉSEL B100 | %VARIACIÓN |
| CO (%)              | 0.025  | 0.013          | - 48%      | 0.029        | 0.020          | -31%       |
| CO <sub>2</sub> (%) | 7.2    | 7.1            | - 1.3%     | 7.8          | 7.8            | 0%         |
| HC (ppm)            | 6.6    | 5.4            | - 18.2%    | 10           | 10             | 0%         |
| NOx (ppm)           | 639.7  | 768.6          | + 20.2%    | 967          | 1063           | +9.9%      |
| O <sub>2</sub> (%)  | 10.7   | 10.9           | +1.9%      | 10.3         | 10.5           | +2.9%      |
| Opacidad (%)        | 3.3    | 1.4            | - 58%      | 2.8          | 1.8            | -35.7%     |

**Tabla 2-4: Resultados experimentos Universidad de Missouri [13]**

Los ensayos muestran que el uso del biodiésel en los motores Diesel provoca una importante reducción de los hidrocarburos totales sin quemar, del monóxido de carbono y de las partículas en suspensión. Las emisiones de los óxidos de nitrógeno aumentan ligeramente. Además el humo negro visible en el escape característico de este tipo de mecánicas (Opacidad) es menos importante con el biodiésel.

Para las pruebas de potencia se utilizó el banco de pruebas de General Motors, bajo las diferentes condiciones que establece el protocolo de medición de potencia de los vehículos. Si bien es cierto que los resultados obtenidos fueron ligeramente desfavorables cuando se operaba con biodiésel, la diferencia no resulta significativa [13].

### 2.2.3 El Experimento del INTA.

En el año 2002 el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de argentina llevó a cabo un experimento de funcionamiento de un tractor Diesel con biodiésel.

| TRACTOR 6.1L           |                                             |
|------------------------|---------------------------------------------|
| Nº de Cilindros        | 6 cilindros en Línea. Refrigerado por aire. |
| Alimentación           | Inyección directa con Bomba Rotativa.       |
| Cilindrada             | 6128 cc                                     |
| Relación de compresión | 19:1                                        |

**Tabla 2-5: Características del motor Tractor 6.1L [14]**

Se hizo funcionar el motor tanto con biodiésel B20 como B100 y se llevaron a cabo ensayos que permitieron la determinación de la curva completa de potencia a fin de determinar las pérdidas de la misma y la viabilidad del uso de biodiésel en el entorno agrícola. Así mismo los ensayos incluyeron interesantes y meticulosas pruebas de consumo de carburante.



**Figura 2-5: Tractor Diesel refrigerado por aire**

Utilizando sensores a distancia para monitorear los distintos parámetros del motor así como las condiciones ambientales se pudo realizar una fiable prueba sobre la variación en el rendimiento y en el consumo entre los combustibles ensayados.

La prueba se realizó con diferentes posiciones del acelerador, así como diferentes revoluciones a incrementos de 200 a 250 rpm. También se varió la carga del motor a incrementos de 300Nm, a fin de que el experimento fuera válido para todo el campo de aplicación de un tractor.

En la siguiente tabla se muestran los resultados del ensayo a máxima potencia:

| <b>Combustible</b> | <b>Potencia(KW)</b> | <b>Potencia<br/>Corregida(KW)<br/>por P y T<sup>a</sup></b> | <b>Par<br/>Motor(Nm)</b> | <b>Consumo<br/>horario(l/h)</b> |
|--------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Gasóleo            | 77.3                | 75.4                                                        | 1162                     | 21.9                            |
| B20                | 75.2                | 76.5                                                        | 1139                     | 23.1                            |
| B100               | 73.7                | 72.6                                                        | 1117                     | 23.7                            |

**Tabla 2-6: Resultados a máxima potencia [14]**

Las diferencias en el consumo son explicables por el menor poder calorífico del aceite vegetal, así como el incremento de la relación estequiométrica de la reacción de combustión debida a la presencia de oxígeno en el biodiésel.

En la siguiente tabla se muestran los resultados promedio obtenidos para diferentes posiciones del acelerador, revoluciones y carga, a fin de hallar los consumos medios del Tractor, que evidentemente en un uso agrícola no va a permanecer girando a máxima potencia de manera permanente:

| Combustible | Potencia(KW) | Consumo horario(l/h) |
|-------------|--------------|----------------------|
| Gasóleo     | 38.5         | 10.6                 |
| B20         | 38.4         | 10.8                 |
| B100        | 39.2         | 12.5                 |

**Tabla 2-7: Resultados promedio [14]**

Por último, en la siguiente gráfica se muestran superpuestas las tres curvas de potencia del tractor elaboradas a lo largo de todo su régimen de revoluciones.

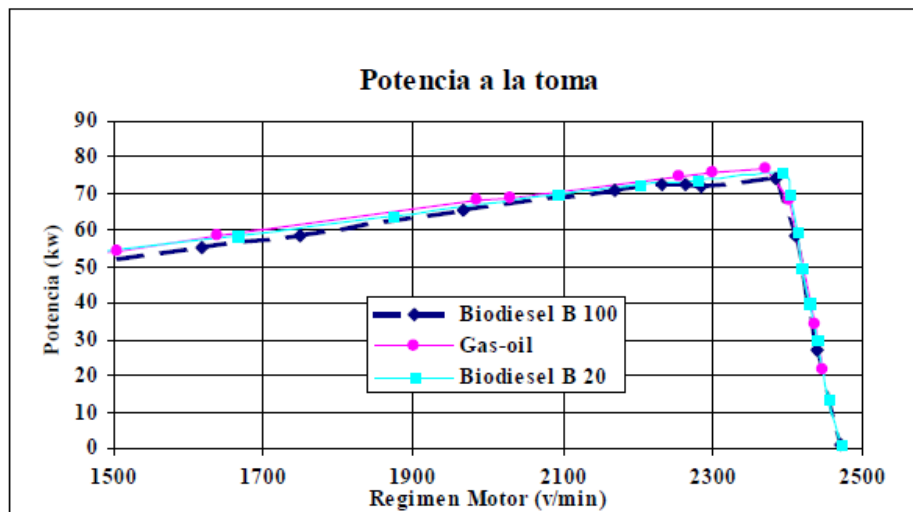


**Figura 2-6: Grafica de curvas de potencia. [14]**

Como conclusión se puede extraer que las diferencias a lo largo de la curva de potencia no superaron el 2,5% por lo que no resultan especialmente significativas y desde luego no serían apreciables en el uso normal de un tractor en el campo.

En el caso del consumo la variación resulta algo más significativa, sobre todo en la prueba de datos promedio, aunque se puede inducir que dicha prueba no es excesivamente fiable, ya que se arrojan datos superiores de potencia para el biodiésel que para el gasóleo convencional, por lo que es deducible que se realizó de forma imprecisa. En el test de régimen máximo la diferencia de consumo entre el gasóleo convencional y el biodiésel puro fue de un 8.2% de consumo superior para el biodiésel [14].

#### *2.2.4 El Experimento de la UCLM en colaboración con la UDEA.*

Este experimento fue realizado en el año 2007 en estrecha colaboración entre la Universidad de Castilla la Mancha y la Universidad de Antioquía (Colombia). El fin era el de comparar las diferencias de rendimiento y consumo que se daban en un motor de una instalación experimental de la Universidad de Castilla La Mancha entre hacerlo trabajar con biodiésel proveniente de distintas fuentes y con gasóleo convencional, tanto ambos combustibles puros, como trabajando mezclados.

El motor, situado en el laboratorio de máquinas térmicas del grupo de combustibles y motores de la citada universidad tiene las siguientes características:

**Motor Instalación Experimental UCLM**

|                        |                                                 |
|------------------------|-------------------------------------------------|
| Nº de Cilindros        | 4 cilindros en línea                            |
| Alimentación           | Inyección directa. Turbocompresor e intercooler |
| Cilindrada             | 2200cc                                          |
| Relación de compresión | 18:1                                            |

**Tabla 2-8: Características del motor UCLM [18]**

El gasóleo que se utilizó fue el gasóleo comercial español de aquel momento, con 350ppmm de azufre. Actualmente es obligatorio que el gasóleo comercial sea bajo en azufre, con 50ppmm. En cuanto a los biocombustibles, se probaron 6 tipos diferentes de biodiésel: unos procedentes de aceite virgen sin usar y otros procedentes de aceites de fritura usados. Los aceites vírgenes fueron aceite de girasol, que es común en España; aceite de colza, muy utilizado en los países de Centroeuropa y una mezcla de girasol y colza a razón de 70 partes de girasol por 30 partes de colza, que cumpliera con la limitación de índice de yodo que exige la norma EN 14214. En cuanto a los aceites de fritura usados, se usaron dos, uno de alto estrés térmico, procedente del sector hostelero y doméstico, y otro de bajo estrés térmico, procedente del sector hospitalario, que tenía una mezcla de oliva, girasol y 20% de palma [18].

Como resultados se pudo observar que:

- La disminución del poder calorífico es lineal con el incremento de biodiésel en la mezcla. El biodiésel puro tiene aproximadamente un 14% menos de poder calorífico que el Diesel puro, o sea, 37 MJ/kg frente a los 45.10MJ/kg del gasóleo. Esto no depende del origen del biodiésel.
- El sistema de Inyección es volumétrico, lo que compensa en parte esta diferencia de poder calorífico introduciendo más cantidad de combustible en la cámara de combustión, lo que redundaba en un mayor consumo, en torno a un 8.5% superior con biodiésel. Este factor apenas varía con el origen del biodiésel.
- El rendimiento del motor no varía apreciablemente ni con el combustible usado ni con el origen del biodiésel empleado.
- Bajo condiciones de régimen estacionario la opacidad del humo disminuyó notablemente, pasando de un 13- 14% con gasóleo a menos de un 5% con biodiésel, independientemente de su procedencia
- El humo generado con el consumo de biodiésel carece totalmente de hidrocarburos aromáticos y de óxidos de azufre y sulfuros.
- Al usar biodiésel la presión máxima de combustión se incrementa ligeramente y como consecuencia también lo hace la temperatura media en la cámara de combustión. Esto explica el hecho de que los óxidos de nitrógeno producidos en la combustión sean ligeramente mayores al utilizar biodiésel.
- El origen del biodiésel resulta irrelevante a efectos de rendimiento a la hora de utilizarlo como combustible.

### 2.2.5 El Experimento de la Universidad del Valle de Guatemala.

[19]En el año 2014 se llevó a cabo un experimento por parte de la Universidad del Valle de Guatemala por el que se compararon las emisiones de gases de dos motores Nissan YD25DDTi pertenecientes a dos Nissan Frontier 2.5Di de 2012. Uno de ellos se utilizó para probar distintas concentraciones de biodiésel, desde B15 hasta B100, mientras que el otro operó únicamente con gasóleo convencional.

#### NISSAN YD25DDTi

|                        |                                                              |
|------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Nº de Cilindros        | 4 cilindros en Línea. 4 válvulas por cilindro.               |
| Alimentación           | Inyección directa Common Rail. Turbocompresor e Intercooler. |
| Cilindrada             | 2488 cc                                                      |
| Relación de compresión | 16.5:1                                                       |
| Diámetro x Carrera     | 89mm x 100mm                                                 |

**Tabla 2-9: Características del motor NISSAN YD25DDTi [20]**



**Figura 2-7: Nissan Frontier 2.5Di**

Para las mediciones de las emisiones en los dos vehículos se hacía circular el vehículo de prueba durante 5.000 km con cada concentración de biodiésel antes de llevar a cabo la prueba. Se realizaron mediciones con un incremento de 5% desde B15 hasta B50, y a partir de ahí con un incremento de 10% hasta el biodiésel puro. En total 65.000km fueron recorridos por la unidad de pruebas. La unidad de control, por su parte, fue sometida a examen a los 5.000km, a los 25.000km, a los 30.000km y a los 35.000km. Todas las mediciones se realizaron a tres regímenes distintos de revoluciones, a saber: 750, 2000 y 3000 rpm

En cuanto a las mediciones de consumo se realizaron de forma manual, apuntando el kilometraje y la cantidad repostada en cada ocasión, y elaborando un promedio a lo largo de los 5.000km que duraba cada prueba.

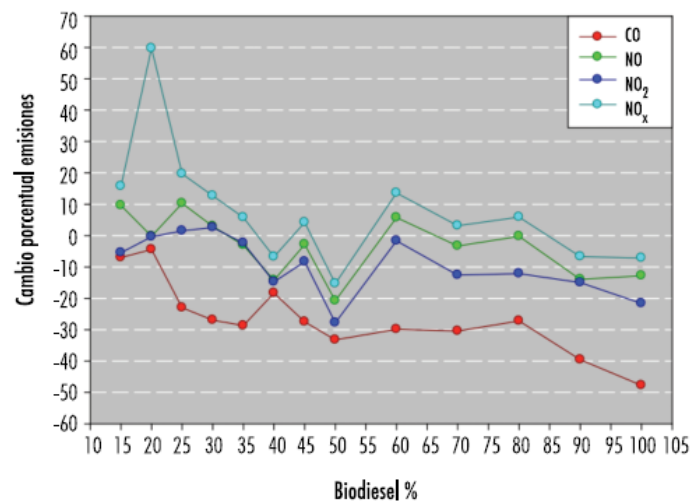


Figura 2-8: Emisiones a 750RPM [19]

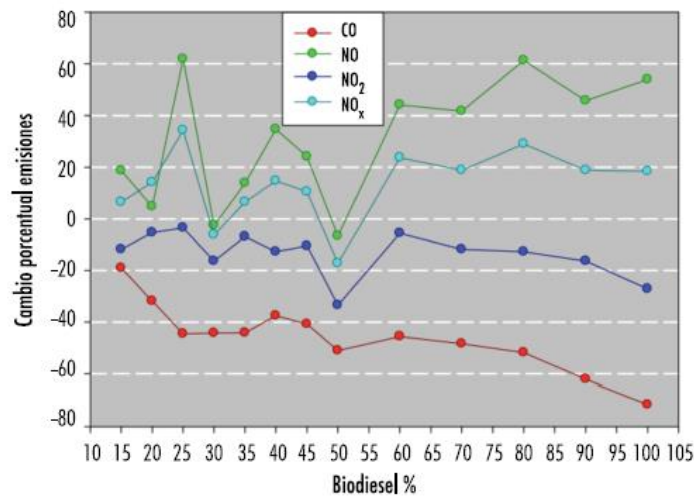


Figura 2-9: Emisiones a 2000RPM [19]

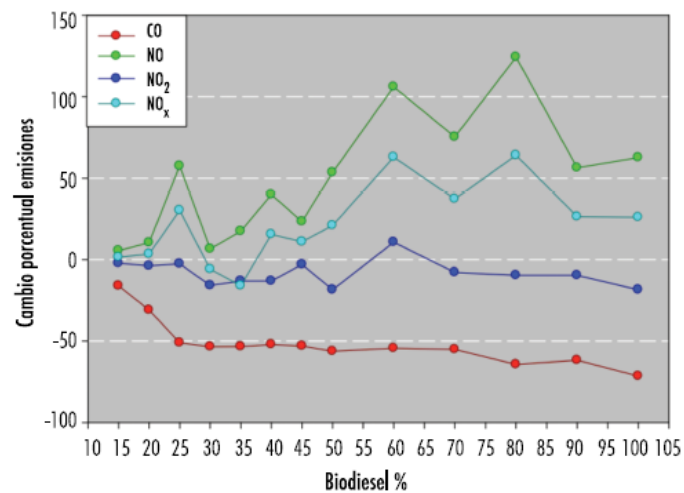


Figura 2-10: Emisiones a 3000RPM [19]

Como resultados cabe destacar el 71.58% de reducción en las emisiones de CO que se llegó a alcanzar. Este gas resulta muy tóxico y además está relacionado con el CO<sub>2</sub>, principal agente culpable del efecto invernadero. No obstante se detectó un incremento de hasta el 59.52% de las emisiones de NO y de hasta el 124.28% de los gases NO<sub>x</sub>.

En cuanto al consumo, se vio incrementado en un 11.82% debido principalmente al menor poder calorífico q hacía disminuir el rendimiento del motor por lo que el consumo aumentaba. De todos modos este dato no es excesivamente fiable, pues hay múltiples factores que afectan al consumo sobre todo cuando se trata como en este caso de dos unidades diferentes del mismo coche. Factores como el rodaje que haya recibido cada unidad, o el estilo de conducción de cada uno de los conductores pueden generar variaciones sustanciales en el consumo, por lo que se puede concluir que el vehículo consume más cuando se alimenta con el biocombustible, pero no se puede saber exactamente la magnitud de la diferencia.

No obstante el interés principal que tiene este experimento es que demuestra que el biodiésel es perfectamente compatible con la inyección directa a alta presión common-rail. Sin embargo en este caso no fue posible realizar los experimentos sobre la misma plataforma porque para adaptar este tipo de mecánicas modernas al uso de biodiésel es necesario hacer una serie de modificaciones que si bien no condenan el uso del vehículo con gasóleo convencional, hacen que no sea interesante realizar el experimento sobre la misma plataforma, pues dichas modificaciones pueden afectar el rendimiento aun cuando se use gasóleo convencional y el objetivo del experimento es comparar el rendimiento del vehículo de serie respecto al que consume biodiésel aunque éste último deba ser modificado.



## 3 PROBLEMÁTICA DEL BIODIÉSEL PARA SU USO EN MOTORES DIESEL

### 3.1 Densidad y viscosidad.

La densidad y viscosidad de los aceites vegetales, para una misma temperatura, tienen valores más altos que los del gasóleo de automoción. Estos parámetros dependen mucho de la temperatura, por lo que con un precalentamiento se pueden alcanzar valores similares a los del gasóleo de automoción a temperatura ambiente. Esto hace posible usar de un modo eficiente aceites vegetales puros en motores Diesel.

Actualmente, los aceites más utilizados para la producción de Biocombustibles (en su mayor parte biodiésel) son, ordenados de mayor a menor uso, el aceite de palma, el de soja, el de colza y por último el de girasol. Por eso es importante caracterizar bien las propiedades físicas de estos aceites, tal como se hace con otras sustancias, para su correcta aplicación.

Hay muchas similitudes entre los aceites vegetales y el gasóleo de automoción que los hacen aptos para su uso en un motor Diesel. Por ejemplo, el poder calorífico inferior es muy similar entre ambos tipos de sustancias. No obstante hay diferencias físicas y químicas. Por lo tanto, al utilizar un aceite vegetal puro como carburante se deben adoptar algunas precauciones. Se sabe que los triglicéridos que contienen los aceites vegetales están formados por moléculas muy largas, lo que implica elevadas viscosidades y baja volatilidad en comparación con el gasóleo tradicional. Esto acarrea una insuficiente atomización del carburante en el seno del aire comprimido en la cámara de combustión, porque a que al ser inyectado en el cilindro produce una pulverización incorrecta. Una viscosidad elevada produce que el chorro de combustible que es inyectado en la cámara de combustión sea más sólido en vez de una pulverización formada por una infinidad de diminutas gotitas, provocando una combustión incompleta, generando humo negro y fomentando el desarrollo de depósitos de carbonilla en la cámara de combustión. También podría conllevar una mayor dilución del aceite vegetal en el aceite lubricante del motor debido a que el aceite vegetal no quemado resbala por las paredes del cilindro hacia el cárter.

Los efectos debidos al uso de aceites vegetales en motores Diesel no modificados dependen mucho del tipo de motor y de las características de los aceites utilizados. Los motores Diesel actuales tienen sistemas de inyección considerablemente sensibles a cambios en la viscosidad y densidad del carburante. No obstante las pruebas realizadas a corto plazo en motores Diesel no modificados demuestran un buen

comportamiento de los aceites vegetales. Sin embargo, las pruebas a largo plazo revelan un incremento de las emisiones de partículas, obstrucción de los inyectores, un incremento en los depósitos de carbonilla en los cilindros así como mezcla de aceite vegetal no quemado con el aceite lubricante del motor. Por eso es importante reducir los valores de la densidad y viscosidad de los aceites vegetales hasta valores cercanos a los del gasóleo de automoción, para de esta manera garantizar una combustión adecuada y un buen rendimiento del motor. Se han estudiado varios métodos para reducir el valor de estos dos parámetros físicos, entre los que destacan mezclas en diferentes proporciones con gasóleo tradicional, la transesterificación de los aceites vegetales o su precalentamiento. Este último método es el escogido en la mayor parte de los casos por su simplicidad y efectividad. No obstante también tendremos en cuenta la transesterificación en el presente proyecto.

El método del precalentamiento para obtener una densidad y viscosidad apropiadas para asegurar una inyección y consecuentemente una combustión adecuadas consiste en precalentar el aceite vegetal antes de su entrada en el sistema de inyección. Una vez caliente, tanto la densidad como la viscosidad del aceite vegetal deberían ser muy similares a las del gasóleo tradicional.

El rango de viscosidades correcto para motores Diesel se sitúa entre 1.6 y 7 mm<sup>2</sup>/s a 40°C, aunque se impone un límite inferior para garantizar una adecuada lubricación de los componentes del sistema de inyección y evitar pérdidas de carburante.

La dependencia de la densidad y la viscosidad de los aceites vegetales con la temperatura se ha determinado experimentalmente. Así se puede optimizar la temperatura de precalentamiento del aceite vegetal empleado como carburante a fin de optimizar su combustión en un motor Diesel actual.

En el caso de aceites vegetales se sabe que su densidad decrece linealmente al aumentar de temperatura. Esta relación se puede formular como:

$$\rho = a + b \cdot T$$

Siendo  $\rho$  la densidad expresada en kg/m<sup>3</sup>, T la temperatura expresada en °C,  $a$  es la ordenada en el origen y  $b$  es la pendiente cuyo valor es negativo.



**Figura 3-1: Densímetro**

La viscosidad, por su parte se puede explicar como una medida de la resistencia que ofrece un fluido a fluir. Al aumentar la temperatura de un fluido, sus moléculas se separan y en conjunto pueden deslizarse más fácilmente, de modo que el fluido reduce su viscosidad. La dependencia de la viscosidad cinemática con la temperatura de un líquido se suele describir por la ecuación de Arrhenius

$$\eta = A_1 \cdot e^{\frac{E_a}{RT}}$$

Siendo  $\eta$  la viscosidad cinemática,  $E_a$  la energía de activación, R la constante universal de los gases perfectos y T la temperatura absoluta. Además:

$$A_1 = N_A \cdot \frac{h}{V}$$

Siendo respectivamente  $N_A$ , V y h, el número de Avogadro, el volumen molecular y la constante de Planck.

En el caso de aceites vegetales la ecuación se puede reescribir de la siguiente manera, siendo conocida como ecuación de Andrade:

$$\eta = A \cdot e^{B/T}$$

Donde T es la temperatura absoluta (K) y A y B son constantes específicas de cada aceite.

Aplicando logaritmos a ambos lados de la ecuación resulta:

$$\ln(\eta) = \ln A + \frac{B}{T}$$

De este modo, mediante una regresión lineal usando el método de los mínimos cuadrados y utilizando  $1/T$  como variable independiente, se puede determinar la relación matemática entre la viscosidad y la temperatura.

En el sistema internacional la viscosidad cinemática se expresa en  $\text{m}^2/\text{s}$ , mientras que en el sistema cegesimal de unidades (CGS) se expresa en Stokes (St), donde  $1\text{St} = 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ .

Es posible también establecer una relación matemática entre la densidad y la viscosidad de un aceite vegetal. Por lo tanto, gracias a esta relación fiable entre la densidad y la viscosidad, a partir de la medida sencilla de la densidad de un aceite vegetal para una temperatura determinada se puede obtener la viscosidad.

De acuerdo con Rodenbush, esta interdependencia se puede establecer como:

$$\rho = C + \frac{D}{\sqrt{\eta}}$$

Donde C y D son constantes específicas del aceite diferentes de A y B. Esta ecuación se puede además ajustar experimentalmente mediante una regresión lineal tomando como variable independiente  $\frac{1}{\sqrt{\eta}}$



**Figura 3-2: Viscosímetro**

No obstante, la determinación exacta de la densidad y la viscosidad únicamente se puede llevar a cabo mediante procesos experimentales, utilizando a tal efecto un viscosímetro y un densímetro convenientemente calibrados respectivamente. Los experimentos de este tipo se realizan a diversas temperaturas a fin de elaborar una relación entre los dos parámetros de interés y la temperatura. Los datos de que se dispone para este proyecto varían de los 10°C a los 100°C.

Se dispone de datos sobre la experimentación con diversas muestras de aceites vegetales puros, incluyendo aceite de soja, de palma, de pepitas de uva, de colza, de girasol y por último de maíz. También existen, y se han incluido, datos del aceite transesterificado (sometido a un costoso proceso que aproxima sus propiedades al gasóleo de automoción) y que es un tipo de biodiésel B100 comercial, en principio apto para motores Diesel sin modificaciones. Por último se incluyen los datos obtenidos con el propio gasóleo de automoción proveniente del petróleo [21].

### *3.1.1 Densidad*

Comenzando con el análisis de la densidad. Mediante el empleo del densímetro obtenemos la siguiente gráfica que relaciona la densidad y la temperatura:

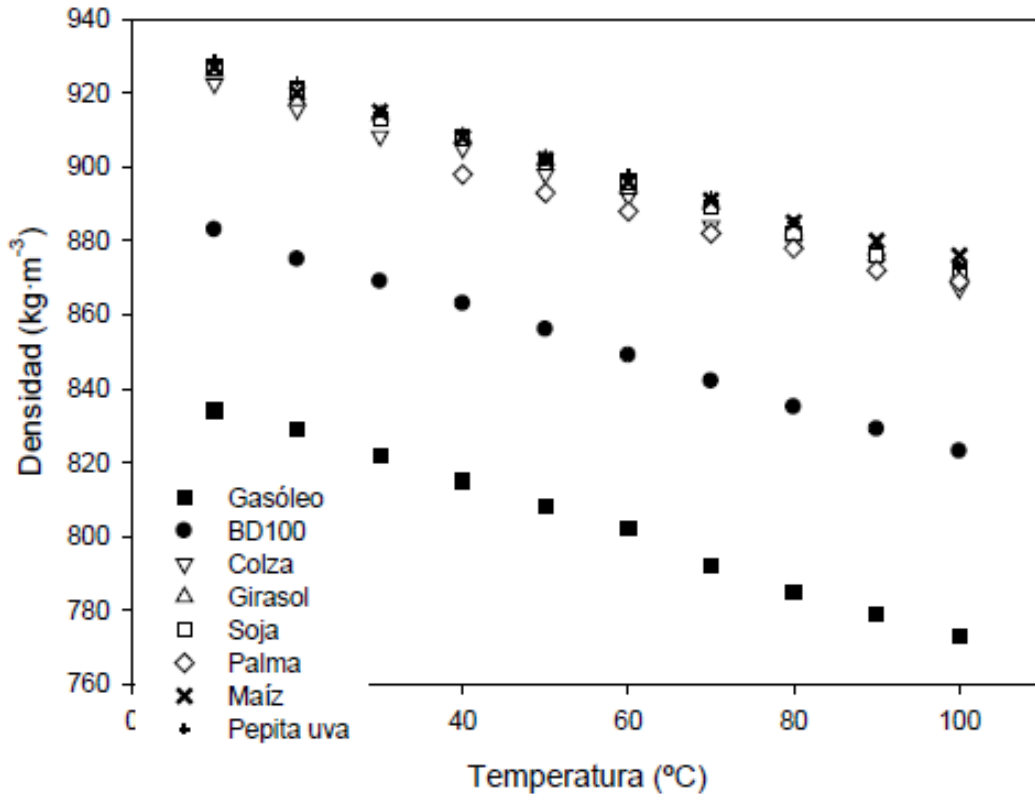


Figura 3-3: Gráfica Densidad-Temperatura de los combustibles analizados [21]

De la gráfica se puede extraer mediante el modelo de regresión lineal los siguientes parámetros  $a$  y  $b$  que se aplicarán a la ecuación que sirve para extraer la temperatura que debe existir entre el gasóleo de automoción y el aceite vegetal para que la densidad sea similar:

$$T = \frac{\rho - a}{b}$$

En los motores de inyección directa de alta presión common-rail se debe alcanzar una densidad muy similar a la del gasóleo de automoción para obtener un correcto funcionamiento. No obstante, para motores más antiguos de inyección indirecta, o inyección directa por bomba rotativa, con alcanzar la densidad del biodiésel transesterificado B100 sería suficiente, pues son sistemas de alimentación más sencillos y tolerantes a una densidad superior. Se ha demostrado, de hecho, que estos motores de inyección más clásicos funcionan con biodiésel transesterificado puro sin problemas.

De esta manera se elabora la siguiente tabla de temperaturas que se deben alcanzar para el correcto funcionamiento de la mecánica. Además se incluye el estadístico  $r^2$ , que se denomina coeficiente de correlación, el cual nos indica el grado de fidelidad entre los datos estimados por el modelo de regresión y los observados realmente, es decir, la exactitud de los valores  $a$  y  $b$ , y por tanto de las temperaturas halladas.

| Muestra                     | $a$ (kg/m <sup>3</sup> )<br>$\rho$ a 0°C | $b$ (kg/m <sup>3</sup> ·°C) | $r^2$  | $T^a$ (°C)<br>$\rho \approx \text{Gasóleo}$ | $T^a$ (°C)<br>$\rho \approx \text{B100}$ |
|-----------------------------|------------------------------------------|-----------------------------|--------|---------------------------------------------|------------------------------------------|
| Gasóleo automoción          | 842.53                                   | -0.7024                     | 0.9975 | 0                                           | - 67.2                                   |
| Biodiésel transesterificado | 889.73                                   | -0.6224                     | 0.9980 | 75.83                                       | 0                                        |
| Aceite de colza             | 927.91                                   | -0.6052                     | 0.9968 | 141.08                                      | 63.09                                    |
| Aceite de girasol           | 934.40                                   | -0.6164                     | 0.9980 | 149.04                                      | 72.47                                    |
| Aceite de soja              | 931.53                                   | -0.5733                     | 0.9970 | 155.24                                      | 72.91                                    |
| Aceite de palma             | 917.61                                   | -0.4964                     | 0.9959 | 151.25                                      | 56.16                                    |
| Aceite de maíz              | 930.63                                   | -0.5634                     | 0.9970 | 156.37                                      | 72.59                                    |
| Aceite de pepitas de uva    | 926.81                                   | -0.5955                     | 0.9968 | 141.53                                      | 62.26                                    |

Tabla 3-1: Densidad de los combustibles analizados [21]

Los resultados de las pruebas, mostrados en la tabla y en la gráfica, indican claramente que la densidad de todas las muestras estudiadas sigue fielmente una dependencia lineal con la temperatura. Además los elevados coeficientes de correlación indican la alta fiabilidad de los datos obtenidos.

Se aprecia claramente que el gasóleo de automoción es el más dependiente de la temperatura, como indica la más pronunciada pendiente  $b$  de la recta de regresión. En los aceites vegetales y en el biodiésel comercial la dependencia es similar, salvo para el aceite de palma, el de densidad más estable a la temperatura de los estudiados.

Utilizando la fórmula de cálculo de temperaturas obtenemos que para motores de inyección directa a alta presión common-rail hay que calentar el aceite vegetal entre 141.08°C y 156°C a fin de que tenga una densidad similar al gasóleo de automoción a 0°C. Dicho calentamiento no es estable, pues al ser las pendientes de las rectas de regresión diferentes en cada carburante, conforme varíe la temperatura ambiente variará ligeramente la temperatura de calentamiento del combustible. Pero en general podremos concluir que para que un motor de inyección directa a alta presión con common-rail funcione correctamente con aceite vegetal, dicho aceite se debe calentar en torno a 150°C

En el caso de utilizar biodiésel B100 comercial transesterificado la temperatura a la que se debe calentar el combustible es menor, y bastaría con elevarla unos 75°C para obtener un rendimiento similar al Diesel convencional en el proceso de inyección.

Si el motor en el que se realizasen las modificaciones fuese un motor de inyección indirecta, o de inyección directa pero sin sistema de alta presión common-rail, no es necesario un precalentamiento tan elevado. Esto queda patente tras haberse comprobado, como se ha mencionado antes en el proyecto, la posibilidad de estos motores de funcionar con biodiésel B100 comercial sin problema ninguno debido a la densidad. Por lo tanto únicamente deberemos elevar la temperatura hasta conseguir que los diversos

aceites vegetales tengan una densidad similar a la del combustible transesterificado. Se cifra dicha temperatura entre 56.16°C y 72.1°C, para conseguir una densidad similar a la del biodiésel B100 transesterificado a 0°C. Por ello podemos concluir que para hacer funcionar un motor con inyección de combustible sin sistema de alta presión, haría falta elevar la temperatura del biocombustible unos 65°C aproximadamente.

### 3.1.2 Viscosidad

En cuanto a los resultados obtenidos en la prueba del viscosímetro, realizada para las mismas muestras con el mismo rango de temperaturas, se observan resultados más complejos que para la prueba de densidad tal como se aprecia en la siguiente gráfica:

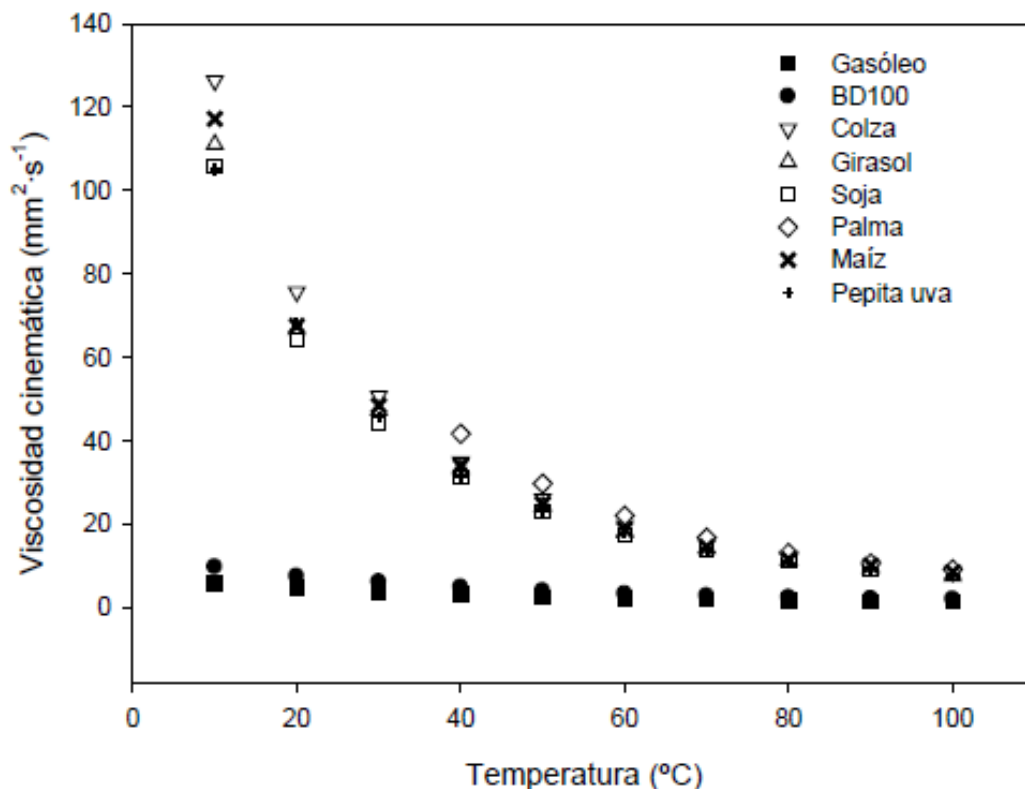


Figura 3-4: Gráfica Viscosidad-Temperatura de los combustibles analizados [21]

Se aprecia en la figura anterior que la viscosidad cinemática del gasóleo procedente del petróleo y del biodiésel transesterificado es claramente inferior a la del resto de aceites combustibles. No obstante calentando debidamente estos últimos se puede llegar a asemejar a la viscosidad del gasóleo sin calentar.

Dado que lo idóneo es obtener una relación lineal entre viscosidad cinemática y temperatura, se busca los factores  $\ln A$  y  $B$  para aplicarlos sobre la ecuación que nos permite hallar la diferencia de temperatura que debe existir entre el gasóleo y los aceites vegetales:

$$T(^{\circ}C) = \frac{B}{\ln(\eta) - \ln A} - 273.15$$

Para ello se establece la gráfica de relación entre  $\ln(\eta)$  y  $1/T$  tal y como se muestra:

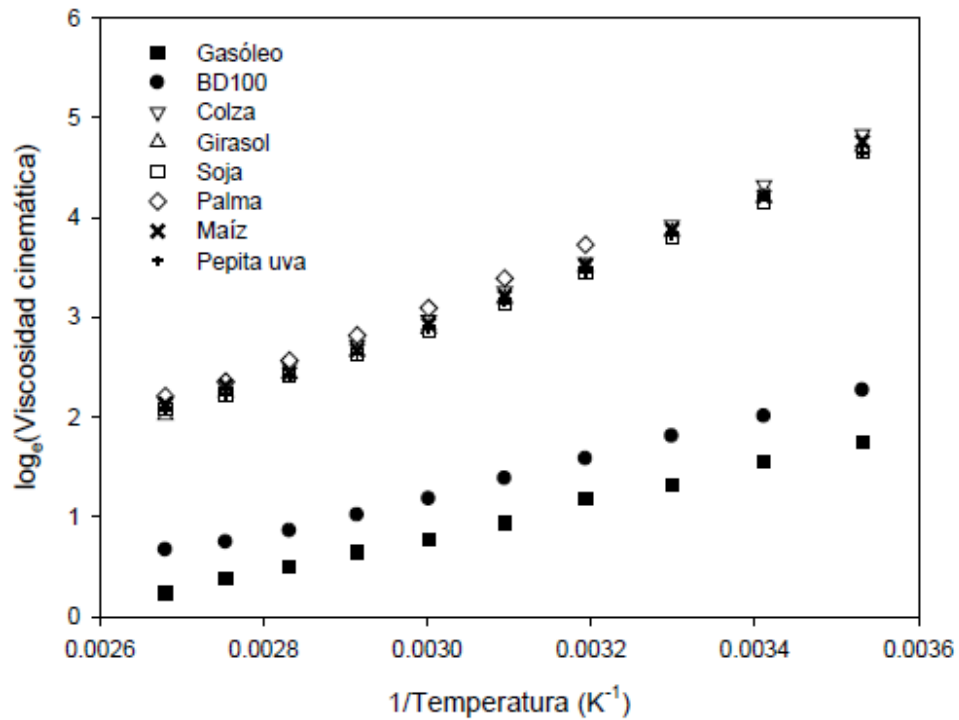


Figura 3-5: Gráfica  $\ln(\eta) - 1/T$  de los combustibles analizados [21]

De esta gráfica y aplicando una sencilla regresión lineal se puede extraer la siguiente tabla de resultados, en la que se vuelve a incluir el coeficiente de correlación  $r^2$  que proporciona la medida de la fiabilidad del dato obtenido, que como se puede apreciar es muy alta.

| Muestra                     | $\ln A$ | B       | $r^2$  | $\eta$ a 0°C<br>(mm <sup>2</sup> /s) | T <sup>a</sup> (°C)<br>$\eta \approx \text{Gasóleo}$ | T <sup>a</sup> (°C)<br>$\eta \approx \text{B100}$ |
|-----------------------------|---------|---------|--------|--------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Gasóleo automoción          | -4.557  | 1785.49 | 0.9985 | 7.27                                 | 0                                                    | -19.92                                            |
| Biodiésel transesterificado | -4.575  | 1929.75 | 0.9964 | 12.11                                | 21.07                                                | 0                                                 |
| Aceite de colza             | -6.353  | 3128.56 | 0.9924 | 165.16                               | 102.12                                               | 80.48                                             |
| Aceite de girasol           | -6.331  | 3093.84 | 0.9955 | 148.67                               | 98.94                                                | 77.43                                             |
| Aceite de soja              | -6.077  | 3001.82 | 0.9922 | 136.40                               | 99.25                                                | 77.08                                             |
| Aceite de palma             | -5.895  | 3000.91 | 0.9956 | 163.59                               | 107.74                                               | 84.57                                             |
| Aceite de maíz              | -6.330  | 3102.21 | 0.9943 | 153.34                               | 99.99                                                | 78.41                                             |
| Aceite de pepitas de uva    | -6.182  | 3039.33 | 0.9938 | 141.33                               | 99.05                                                | 77.16                                             |

Tabla 3-2: Viscosidad de los combustibles [21]

Tal y como se puede observar en los resultados, la diferencia entre las temperaturas a las que hay que elevar el combustible para el funcionamiento en un motor Diesel con inyección directa a alta presión common-rail y las necesarias para un motor que carezca de este sistema son mucho más pequeñas de lo que lo son cuando se habla en términos de densidad.

Así, tal y como se aprecia, con la temperatura a la que era necesario elevar el combustible para disminuir la densidad hasta los valores del gasóleo de automoción convencional (en torno a 150°C) es mucho más que suficiente para alcanzar los valores de viscosidad cinemática similares al combustible de origen fósil, situados en torno a los 100°C.

Sin embargo, esto no ocurre cuando hablamos de la temperatura precisada para hacer funcionar un motor Diesel con inyección indirecta o directa pero sin sistema de alta presión common-rail. Mientras que en términos de densidad bastaba con elevar la temperatura del combustible de origen vegetal unos 65°C a fin de alcanzar la densidad del biocombustible B100 transesterificado, cuando hablamos de viscosidad cinemática esta temperatura ha de ser superior. Está comprobado que se debe elevar la temperatura del combustible entre 77.16°C y 84.57°C para alcanzar una viscosidad cinemática a la del biocombustible B100 transesterificado. Dado que esto es una aproximación obtenida mediante un proceso experimental, situaremos en 80°C el promedio de temperatura al que se debe elevar el aceite vegetal para hacer funcionar un motor de inyección indirecta o directa pero sin sistema de alta presión common-rail.

### *3.1.3 Temperaturas obtenidas*

Así, se obtiene como resultados que se debe elevar la temperatura del aceite vegetal o biocombustible no transesterificado unos 150°C para hacer funcionar modernos motores con sistemas de inyección a alta presión. Aunque bastará con elevarla 75°C si queremos hacerlos funcionar con biodiésel comercial transesterificado. Con elevar la temperatura del biocombustible no transesterificado unos 80°C será suficiente para que dicho combustible pueda ser utilizado en los motores más antiguos o simples que cuenten con sistemas de inyección menos elaborados. El biodiésel transesterificado debería funcionar sin necesidad de modificaciones en este último tipo de motores.

## **3.2 Propiedades frías del biodiésel**

En países de clima frío, resulta un inconveniente el uso del biodiésel por su fácil congelación a bajas temperaturas. El biodiésel derivado de grasas o aceites presenta los siguientes puntos: punto de enturbiamiento (cloud point, CP), punto de obstrucción de filtro frío (POFF), y punto de congelación (pour point, PP), con valores más elevados que el gasóleo normal debido a las grandes cantidades de ésteres metílicos derivados de ácidos grasos saturados. Por lo tanto, sus propiedades frías son menos satisfactorias y podrían limitar su uso en determinadas circunstancias [22, 23].

Si se pretende extender el uso del biodiésel en países con clima frío, las características de flujo a baja temperatura deben ser mejoradas. Debido a esto la mejora del punto de enturbiamiento, punto de congelación y punto de obstrucción de filtro frío se debe tener en cuenta en este proyecto.

Según la norma internacional EN 23015, relacionada con los productos petrolíferos, se define punto de enturbiamiento (CP) como la temperatura a la que empieza a aparecer una nube de cristales de parafina en un líquido cuando se enfría en condiciones especificadas, adquiriendo así un aspecto turbio. La solubilidad del aceite y el peso molecular de las sustancias disueltas en el mismo influyen en la temperatura de dicho punto. La solubilidad está directamente relacionada con la temperatura por lo que

si baja ésta la solubilidad disminuye, haciendo que sustancias disueltas se separen del aceite y queden en su seno. Estas sustancias separadas suelen ser aglomeraciones de parafinas aunque el biodiésel también puede contener otras sustancias susceptibles de separarse del aceite, elevando el punto de enturbiamiento. Igualmente, el almacenamiento prolongado favorece la aglomeración de parafinas y el enturbiamiento, aun sin existir una temperatura especialmente baja.

No obstante, esta característica es de especial significación en los aceites que operan en temperaturas ambiente muy bajas, ya que las parafinas aglomeradas y sustancias no disueltas afectan a la facilidad para bombear el aceite y aumentan las posibilidades de obstruir filtros y pequeños orificios.

Por su parte, la norma EN 21320 define el punto de congelación (PP) como la temperatura más baja a la cual el aceite se observa que fluye bajo condiciones determinadas. Es decir, el punto más bajo antes de solidificarse por completo. El punto de congelación se alcanza siempre a temperatura inferior a la del punto de enturbiamiento y, al igual que este, es una característica importante en aquellos aceites que operan a muy bajas temperaturas ambientales.

El punto de obstrucción de filtro frío (POFF) se define como la temperatura más baja a la que al menos 20 ml de combustible pasan a través de un filtro de tamiz de malla de 45 mm con un diámetro de 15 mm en un tiempo inferior a 1 minuto. La norma europea EN 14214 marca los límites máximos permitidos de POFF para el biodiésel, que corresponden a 0 °C en verano, y -10 °C en invierno.

Con el fin de superar los problemas de comportamiento que el biodiésel presenta ante el frío y los malos resultados en las pruebas de puntos de enturbiamiento, congelación y POFF, se han desarrollado distintas técnicas:

- Mezclar el biodiésel con gasóleo convencional derivado del petróleo.
- Preparación de biodiésel a partir de ésteres grasos con cadenas ramificadas, o bien añadir sustituyentes voluminosos a la cadena.
- Proceso de Winterización.
- Uso de aditivos.

En la actualidad, mezclar biodiésel con gasóleo tradicional es el método más utilizado. El combustible fósil evita la precipitación de los cristales, lo que se refleja en una mejora en las propiedades frías de la mezcla. En la tabla siguiente se puede comprobar como variando el porcentaje de la mezcla de gasóleo y biodiésel varía el comportamiento del combustible ante las bajas temperaturas.

| <b>Mezcla</b>       | <b>Punto de enturbiamiento (°C)</b> | <b>Punto de congelación (°C)</b> |
|---------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| Biodiésel puro B100 | 3                                   | 0                                |
| Biodiésel B80       | 0                                   | -3                               |
| Biodiésel B60       | -4                                  | -6.5                             |
| Biodiésel B40       | -8                                  | -11                              |
| Biodiésel B20       | -12                                 | -14.5                            |
| Diesel convencional | -17                                 | -19.5                            |

**Tabla 3-3: Propiedades frías según porcentaje de biodiésel [22]**

No obstante esta posibilidad es la que menos éxito tiene en la actualidad, ya que uno de los objetivos del biodiésel es eliminar completamente la dependencia del petróleo, y de esta manera se disminuye esta dependencia, pero no se elimina.

Otra opción para influir en las propiedades frías del combustible es la síntesis, que introduce un constituyente voluminoso en la cadena de esteres grasos, como podría ser introducir un acilo en un doble enlace. Se considera la hipótesis de que un constituyente voluminoso interrumpe el equilibrio durante la fase sólida de formación, y la orientación en una dirección de la cadena. Igual efecto se aprecia con el uso de un segundo isopropil- e isobutilalcohol en la preparación de ésteres. Sin embargo, debido a razones económicas las actuales posibilidades e interés de estudio en esta vía son limitadas.

La winterización por su parte es un proceso que elimina mediante filtración la fracción sólida o aglomeraciones de parafinas formadas durante el enfriamiento, mientras que la fracción líquida, formada fundamentalmente por compuestos insaturados, y que muestra valores más bajos de CP y PP, se convierte en el combustible a utilizar. La winterización elimina por tanto los ésteres grasos, especialmente saturados. El proceso se lleva a cabo mediante un enfriamiento lento del combustible y sucesivos filtrados conforme se va produciendo enturbiamiento. Este proceso requiere un gran gasto energético en concepto de refrigeración, necesaria para enfriar el biodiésel y llevar a cabo el filtrado. Además éste proceso presenta un bajo rendimiento, alrededor del 33%.

El tratamiento con aditivos químicos es otra alternativa, y es la única de las soluciones propuestas que se puede llevar a cabo posteriormente a la producción del biodiésel y de una manera rápida y sencilla. La winterización o modificar la preparación del biodiésel es un método eficaz, pero ha de ser llevado a cabo en la etapa de producción y por lo tanto es poco viable a nivel usuario. Con los aditivos permitimos al usuario de biodiésel utilizar su vehículo en climas fríos aun cuando el biodiésel repostado no haya sido sometido a los procesos antes citados que permitan su uso con temperaturas bajas.

En este sentido se han estudiado las reacciones del biodiésel ante el dopaje con diversas sustancias. Inicialmente se llevaron a cabo investigaciones sobre las reacciones que se obtendrían de la mezcla del biodiésel con alcoholes. Se observa que el punto de enturbiamiento efectivamente baja, pero no hay variación apreciable en referencia al punto de congelación y en cambio sí que se produce un incremento de la viscosidad, lo que puede implicar, como previamente se ha demostrado, un funcionamiento deficiente del motor.

Otras de las principales sustancias que se estudian para funcionar como aditivos son las que están basadas en derivados de la glicerina. La investigación en este camino ha recibido un mayor impulso que otros compuestos porque la glicerina es un subproducto que se obtiene en el proceso de producción del biodiésel, por lo que el hecho de que pueda ser utilizada en la mejora de las propiedades del combustible resulta mucho más interesante que otras vías de investigación.

No obstante, en la actualidad no se ha conseguido que estas sustancias ofrezcan unos resultados satisfactorios, ya que el decremento en la temperatura del punto de enturbiamiento y de congelación resulta muy pequeño cuando no nulo, y únicamente el POFF con el diacetato de glicerina (DAG) se ve más afectado, como se aprecia en la siguiente figura, pero ni siquiera es efectivo con todos los biocombustibles. El resto de derivados de la glicerina no han producido aun resultados concluyentes y se debe continuar investigando.

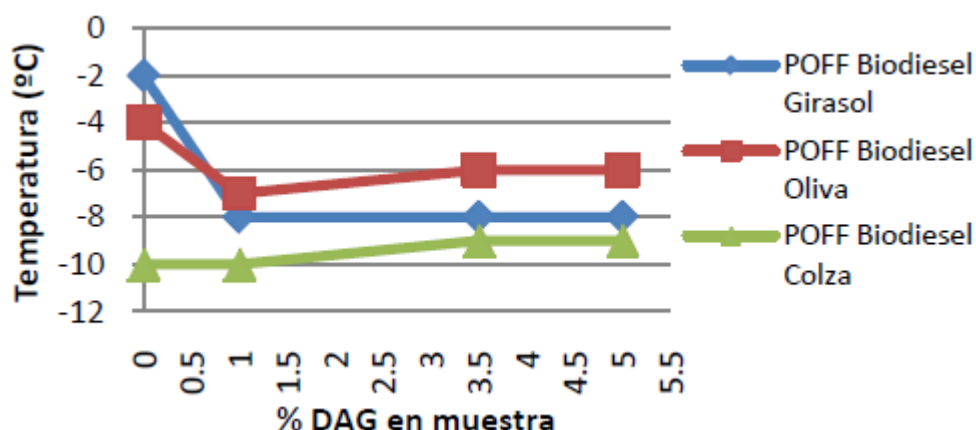


Figura 3-6: Grafica POFF-DAG distintos biocombustibles

Sin embargo, en los países nórdicos está ampliamente extendido el uso de aditivos a base de polímeros y disolventes orgánicos que son capaces de bajar la temperatura tanto de los puntos de enturbiamiento, como congelación. Estos aditivos están diseñados para su empleo con gasóleo convencional comercial derivado del petróleo, no obstante se han realizado experimentos sobre biodiésel derivado del aceite de girasol, de oliva y de colza con estos aditivos en distintas proporciones y se han obtenido excelentes resultados. Los experimentos se obtuvieron comprobando tanto el CP, como el PP como el POFF en las distintas muestras de biodiésel, y luego se repiten las pruebas con el aditivo comercial diseñado para el gasóleo convencional mezclado en distintas proporciones. Los resultados se pueden observar en las siguientes tablas:

| % Biodiésel | %Aditivo comercial | CP (°C) | PP (°C) | POFF (°C) |
|-------------|--------------------|---------|---------|-----------|
| 100         | 0                  | 3       | 0       | 1         |
| 99          | 1                  | -4      | -10     | 17        |
| 96.5        | 3.5                | -4      | -12     | 19        |
| 95          | 5                  | -4      | -13     | 20        |

Tabla 3-4: Biodiésel procedente de aceite de girasol [23]

| %Biodiésel | %Aditivo comercial | CP (°C) | PP (°C) | POFF (°C) |
|------------|--------------------|---------|---------|-----------|
| 100        | 0                  | -2.5    | -5.5    | -4        |
| 99         | 1                  | -1      | -11     | -7        |
| 96.5       | 3.5                | -1      | -11     | -7        |
| 95         | 5                  | -1      | -11     | -7        |

Tabla 3-5 Biodiésel procedente de aceite de oliva [23]

| %Biodiésel | %Aditivo comercial | CP (°C) | PP (°C) | POFF (°C) |
|------------|--------------------|---------|---------|-----------|
| 100        | 0                  | -3      | -14     | -10       |
| 99         | 1                  | -7      | < -20   | -11       |
| 96.5       | 3.5                | -10     | < -20   | -12       |
| 95         | 5                  | -12     | < -20   | -20       |

Tabla 3-6 Biodiésel procedente de aceite de colza [23]

Como se puede observar el biodiésel de aceite de colza es el que presenta de antemano mejores propiedades frías. En las medidas de punto de enturbiamiento no es tan notable, pero en el punto de congelación la diferencia respecto al aceite de colza es de 14°C en comparación con el procedente de aceite de girasol y de casi 9°C con el procedente de aceite de oliva. Debido a estas buenas propiedades frías, el aceite de colza es el más empleado en países nórdicos, donde se alcanzan temperaturas muy bajas. Este hecho está relacionado con su mayor composición de ésteres metílicos insaturados y menor cantidad de moléculas saturadas, que son las que conforme la temperatura ambiente disminuye, empiezan a formar cristales finos e inapreciables a simple vista que van aumentando hasta tener tamaños que disminuyen la fluidez y por último provocan la congelación.

En las figuras 3-7, 3-8 y 3-9 se muestra la relación entre la composición de ácidos grasos saturados frente al punto de obstrucción de filtro frío, el punto de enturbiamiento y el punto de congelación:

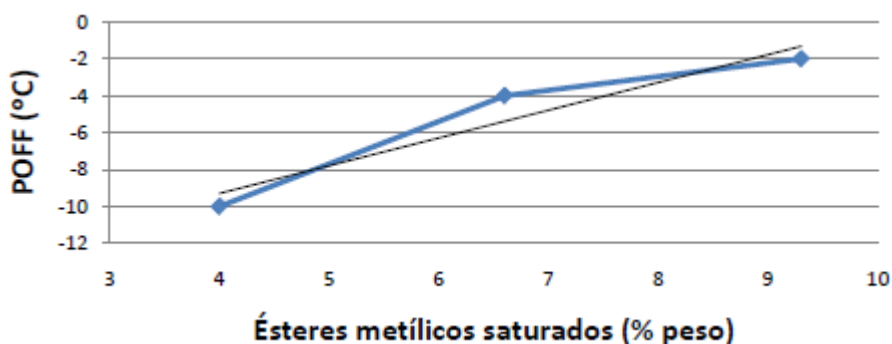


Figura 3-7: Gráfica esteres metílicos saturados-POFF

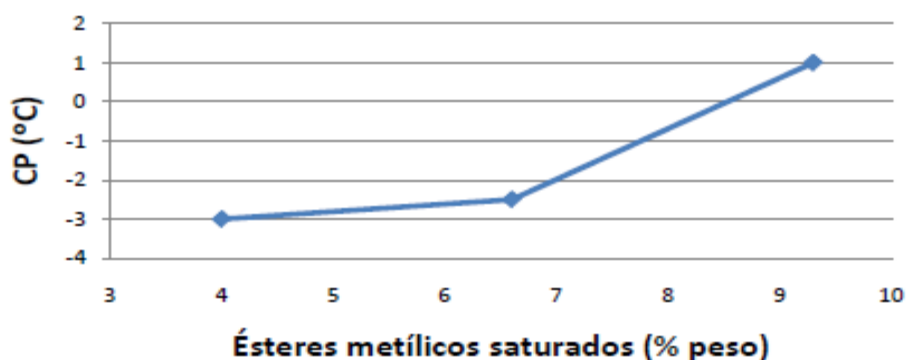


Figura 3-8: Gráfica esteres metílicos saturados-CP

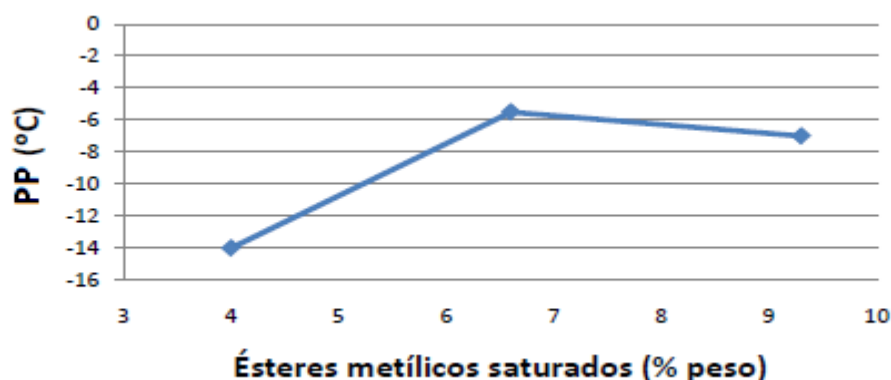


Figura 3-9: Gráfica ésteres metílicos saturados-PP

En cuanto al comportamiento tras añadir el aditivo se observa que depende mucho del tipo de biodiésel con el que se realice la muestra. Cabe mencionar que de los tres aspectos considerados el más importante para este proyecto es el punto de congelación. Este aspecto es el que tiene un mayor efecto debido a la posible necesidad de calentamiento del combustible, que se lleva a cabo previamente al filtro de combustible. En el caso de congelarse el combustible no fluiría por la línea y no podría cebarse el calentador, siendo imposible el funcionamiento del motor.

Para este aspecto se ha comprobado que el aditivo resulta muy eficaz y podría ser una buena solución al problema que presenta el biodiésel para su uso en climas fríos. No obstante, cabe destacar que el aditivo en el biodiésel de aceite de girasol produce un aumento considerable de la viscosidad, lo que resulta en un incremento de la temperatura de POFF. Esto ha de tenerse en cuenta pues sería preciso aumentar la temperatura de precalentamiento en el caso de tratarse de un motor Diesel de inyección indirecta o directa sin sistema common-rail, a fin de mantener esta propiedad cercana a la del gasóleo convencional una vez se haya llevado a cabo el precalentamiento. En el caso de los motores con sistema common-rail no sería necesario realizar este proceso, pues como se calculó en su momento el factor que determina claramente la temperatura de precalentamiento no es la viscosidad, sino la densidad.

Tanto en el aceite de colza como en el aceite de oliva, el uso del aditivo no trae consecuencias negativas, siendo especialmente útil en el biodiésel de colza, donde se llegan a mejorar incluso algunas de las propiedades con respecto al gasóleo convencional.

### 3.3 Compatibilidad de los materiales:

Uno de los posibles problemas del uso de biodiésel en motores Diesel es la compatibilidad de los distintos materiales que constituyen el motor frente al biocombustible. Se han hecho algunas pruebas con materiales típicos que se encuentran en motores Diesel, pero se necesitan más datos para la amplia variedad de grados y variaciones de compuestos que se pueden encontrar en el biodiésel así como de los diferentes materiales que se usan en la construcción de las mecánicas y especialmente de aquellos subsistemas expuestos al contacto con combustible. No obstante, existen ya algunos resultados de los estudios de compatibilidad de materiales con biodiésel y mezclas del mismo con gasóleo fósil.

Los subsistemas en contacto directo con combustible son el sistema alimentación, la cámara de combustión y el sistema de escape. El sistema de alimentación de combustible tiene como misión extraer el combustible del depósito y entregarlo a los inyectores de cada cilindro. Se compone para ello del

depósito, filtro previo de combustible, bomba de alimentación, filtro, bomba inyectora, inyectores y una serie de conductos. En la cámara de combustión el combustible se quema una vez que se inyecta en el aire previamente comprimido. Entre los elementos que pueden entrar en contacto con el combustible durante la combustión se encuentran el bloque de cilindros, las camisas de cilindros, la culata, las válvulas de admisión y escape, los pistones con sus segmentos, el bulón y las bielas. Por último, el sistema de escape conduce al exterior los gases procedentes de la combustión. Cuenta para ello con el colector de escape el convertidor catalítico (destinado a convertir la mayor parte de las sustancias contaminantes en inocuas) y los silenciadores.

El combustible entra en contacto con una gama amplia de materiales metálicos y no metálicos durante su paso por los diferentes sistemas. El combustible llega en estado líquido hasta los inyectores y entra en la cámara de combustión pulverizándose y mezclándose con el aire comprimido. Tras la combustión el combustible se ha transformado en otros productos y por lo tanto afecta de forma diferente a los materiales que encuentra en el sistema de escape. Si en motor presenta mal funcionamiento, puede ocurrir que el combustible pase líquido o pulverizado al sistema de escape, en cuyo caso habría que estudiar la reacción del combustible líquido sobre los materiales que encontrará en el sistema de escape.

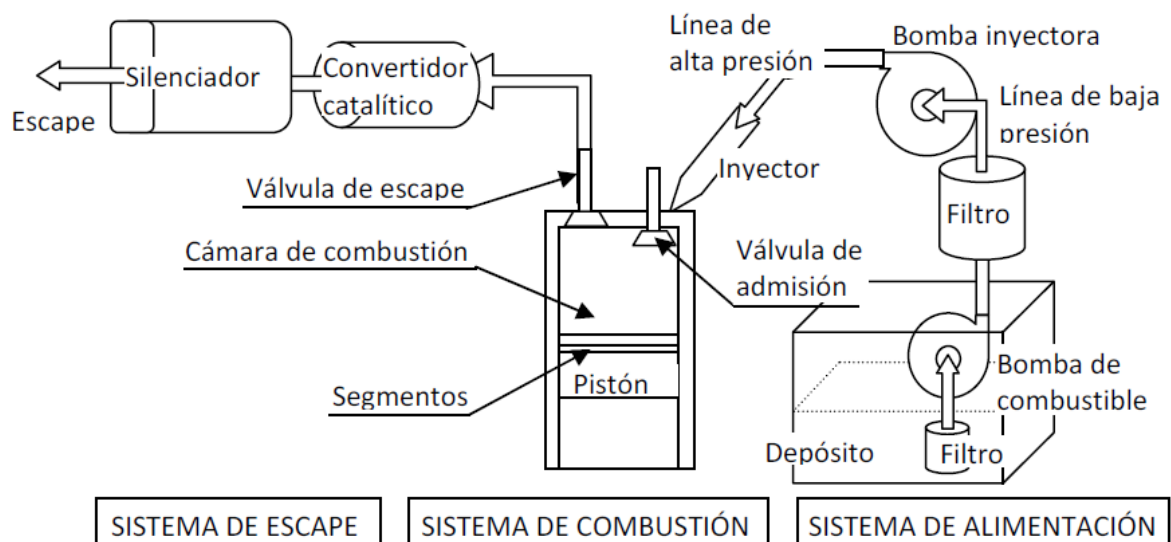


Figura 3-10: Sistemas en posible contacto con el combustible

A continuación se detallan los tipos de materiales de uso común en un motor Diesel correspondientes al sistema de alimentación, bloque motor y sistema de escape, esto es, aquellos con los que puede entrar en contacto el combustible.

➤ **Sistema de alimentación:**

- Tanque de combustible: Construido en acero o plástico, y con una junta de elastómero, papel, corcho o cobre.
- Bomba de Combustible: Aleaciones de aluminio, hierro y cobre.
- Líneas de combustible: Acero, plásticos y caucho.
- Filtro de combustible: Papel del elemento filtrante y aluminio a plástico de la carcasa.
- Inyector: Acero inoxidable y juntas de elastómero.

➤ **Sistema de combustión:**

- Culata: Función gris, aluminio.
- Camisas: Acero, fundición gris, aluminio.
- Válvulas: Acero
- Pistón: Aluminio, fundición gris.
- Segmentos: Acero, hierro.
- Bulón: Aleación de cobre.

➤ **Sistema de escape:**

- Colector: Acero.
- Silenciador: acero, aluminio.
- Catalizador: Acero, cerámica, paladio, rodio, platino.

Los materiales metálicos los podemos clasificar en metales ferrosos como el acero y la fundición y metales no ferrosos como el aluminio, el cobre y sus diferentes aleaciones. Los materiales no metálicos más comunes son los elastómeros, plásticos, pinturas, papel, etc. El combustible entra en contacto con todos estos materiales bajo diferentes condiciones de temperatura, velocidad y presión, además de en diferente estado de corrosión, desgaste y degradación de los materiales [24].

### *3.3.1 Compatibilidad con materiales plásticos:*

A lo largo del circuito que sigue el combustible son muchos y muy variados los tipos de polímeros plásticos con los que puede entrar en contacto el biodiésel. Por ello se hace necesario llevar a cabo un preciso estudio de compatibilidad.

Problemas como la desintegración de los polímeros plásticos o su debilitamiento podrían tener consecuencias catastróficas en la mecánica. Un manguito que se desintegre provocará a corto plazo obstrucciones en el filtro y pérdidas de combustible. Una junta de goma de un inyector o de la bomba de combustible del vehículo puede sencillamente impedir que el vehículo funcione y obligar a una costosa reparación en la pieza afectada.

Otros problemas como el endurecimiento o el reblandecimiento del polímero pueden provocar averías menos importantes pero que aun así impedirían el funcionamiento del vehículo. Averías de este estilo podrían considerarse el quebrado del manguito por las vibraciones del motor en el caso de manguitos endurecidos, o la fisura de un manguito reblandecido por la presión del combustible en su recorrido desde la bomba de inyección hasta los inyectores. Si bien son problemas que se solucionan con el simple cambio del conducto afectado, impiden el funcionamiento del vehículo pues el combustible, evidentemente, no es conducido a su destino.

La determinación de los distintos tipos de polímeros que intervienen en el circuito de combustible de un vehículo es complicada, ya que a lo largo de la historia de la automoción se han empleado muy diversos polímeros en la construcción de vehículos, es por eso que en la tabla 3-7 se han incluido los efectos observados en los principales polímeros plásticos al entrar en contacto con biodiésel. No todos ellos forman parte del circuito de combustible de todos los automóviles, sino que dependiendo del fabricante, modelo y edad del vehículo incluirá unos u otros.

| <b>Material</b>             | <b>Compatibilidad</b>                                         |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Buna-N                      | Compatibilidad no recomendada                                 |
| Butadieno                   | Compatibilidad no recomendada                                 |
| Butilo                      | Degradación leve                                              |
| Chemraz                     | Compatible                                                    |
| Etileno propileno           | Degradación media                                             |
| Fluorocarbono               | Compatible                                                    |
| Fluorosilicio               | Degradación leve y aumento de tamaño                          |
| Fluorosilicona              | Degradación leve                                              |
| Hifluor                     | Compatible                                                    |
| Hypalon                     | Compatibilidad no recomendada                                 |
| Caucho natural              | Incompatible                                                  |
| Neopreno                    | Compatibilidad no recomendada                                 |
| Neopreno / Cloropreno       | Compatibilidad no recomendada                                 |
| Nitrilo                     | Compatibilidad no recomendada                                 |
| Alto aceto-nitrilo          | Degradación leve a partir de B20 y aumento de tamaño          |
| Nitrilo hidrogenado         | Compatibilidad no recomendada                                 |
| Nitrilo curado con peróxido | Degradación leve a partir de B20 y aumento de tamaño          |
| Cordel                      | Degradación media a grave                                     |
| Nylon                       | Compatible                                                    |
| Perfluoroelastómero         | Compatible                                                    |
| Polipropileno               | Degradación media, aumento de tamaño y reducción de la dureza |
| Poliuretano                 | Degradación leve y aumento de tamaño                          |
| Estireno-butadieno          | Compatibilidad no recomendada                                 |
| Teflón                      | Compatible                                                    |
| Vitón                       | Compatible                                                    |
| Vitón A-401C                | Compatible                                                    |
| Vitón F-605C                | Compatible                                                    |
| Vitón GBL-5                 | Compatible                                                    |
| Vitón GF-5                  | Compatible                                                    |
| Wil-flex                    | Degradación media a grave.                                    |

**Tabla 3-7: Compatibilidad con materiales plásticos [25]**

Como se puede apreciar, en general el biodiésel en estado puro (B100) degrada en mayor o menor grado los elastómeros, adhesivos y plásticos cuando existe una exposición prolongada. Los compuestos de nitrilo de goma, caucho natural, polipropileno, polietileno, polivinilo y materiales de tygon son particularmente vulnerables al biodiésel.

Así mismo se puede apreciar la gran variedad de materiales plásticos con los que no se recomienda que el biodiésel entre en contacto, aunque en principio resultan compatibles sin problema, no se ha podido observar su efecto en una exposición prolongada, momento en el cual podrían producirse efectos que limitasen la vida útil de los componentes.

Por último, se debe tener en cuenta que los efectos de la compatibilidad de estos materiales con el biocombustible son proporcionales a las concentraciones de las mezclas de biodiésel con gasóleo convencional. Para concentraciones bajas (menos de B5) ya se ha comprobado que no existe problema de compatibilidad alguno con ningún material [25].

### *3.3.2 Compatibilidad con materiales metálicos*

[25]La corrosión se entiende como el ataque químico o electroquímico de los metales por su entorno. En el caso de las superficies metálicas expuestas al biodiésel, el proceso de corrosión se ha atribuido principalmente a una reacción química, siendo principalmente los productos de la corrosión sales de ácidos grasos u óxidos metálicos, aunque depende del metal estudiado. Se sabe que por lo general el biodiésel es más corrosivo que el gasóleo convencional. Las características corrosivas del biodiésel son muy importantes para mantener la durabilidad a largo plazo de las piezas del motor. La corrosión de los metales también puede desencadenar o catalizar otras reacciones indeseables que conllevan a la inestabilidad y degradación del biodiésel.

La naturaleza corrosiva del biodiésel también puede provenir de impurezas existentes en el mismo como son el agua, el metanol, la glicerina, los ácidos grasos libres, o los catalizadores como sodio y potasio restantes después de la producción del combustible o fruto de la reversibilidad de la reacción química que produce los ésteres.

La mayoría de los estudios se han realizado en base a elementos metálicos comercialmente puros, pero existen escasos estudios realizados sobre piezas reales. Estas piezas no solo es que en su mayoría son aleaciones metálicas y no elementos puros, sino que además se ven afectadas por procesos de conformado, tratamientos térmicos, tratamientos superficiales y otras técnicas propias de fabricación que pueden afectar a su reactividad con el biodiésel. Esto hace necesario seguir estudiando las compatibilidades entre el biodiésel de diferentes tipos y los distintos materiales que pueden entrar en contacto con él.

La corrosión también depende de la temperatura, al menos dentro de unos rangos se ha comprobado experimentalmente que se dan velocidades de corrosión altas a temperaturas altas. También se ha observado que las tasas de corrosión de materiales metálicos frente a biodiésel de diferente materia prima son diferentes, por lo que se infiere que la corrosión también está relacionada con la composición química de cada biodiésel. Sin embargo la corrosión del metal, a diferencia de algunos polímeros plásticos, no adquiere un carácter grave a corto plazo prácticamente en ninguno de los casos estudiados, lo que demuestra que en general los componentes del sistema de alimentación de combustible están preparados para el uso de biodiésel, y solo a largo plazo debe tenerse en cuenta un posible decremento de la durabilidad de ciertos sistemas del motor si no se llevan a cabo modificaciones.

No obstante el otro problema que se presenta en la compatibilidad de los metales, son los efectos que dichos metales puedan causar sobre el biodiésel. En la siguiente tabla se presentan las compatibilidades y efectos que hay que tener en cuenta a la hora de exponer el biodiésel al contacto prolongado con distintos metales.

| <b>Material</b>         | <b>Compatibilidad</b>                                   |
|-------------------------|---------------------------------------------------------|
| Latón                   | No compatible a largo plazo.                            |
| Bronce                  | Acelera oxidación combustible. No apto para almacenaje. |
| Cobre                   | No compatible a largo plazo.                            |
| Plomo                   | Acelera oxidación combustible. No apto para almacenaje. |
| Estaño                  | Acelera oxidación combustible. No apto para almacenaje. |
| Zinc                    | No compatible a largo plazo.                            |
| Acero galvanizado       | No compatible a largo plazo.                            |
| Aleaciones Estaño-Plomo | No compatible a largo plazo                             |
| Acero Inoxidable        | Compatible. Incremento leve de acidez del combustible.  |
| Acero                   | Compatible.                                             |
| Aluminio                | Compatible.                                             |

**Figura 3-11: Compatibilidad con materiales metálicos [25]**

Cuando se oxida el biodiésel se produce un aumento en la viscosidad y la densidad, lo que produce la formación de sedimentos y sales que colmatan filtros y produce incrustaciones en los inyectores, entre otros efectos. No obstante hace falta tiempo prolongado de exposición estática para que se produzca este efecto, únicamente hay que tener en cuenta que ciertos metales la aceleran, pero aun así normalmente son necesarios meses, por lo tanto solo se deberá tener en cuenta en el caso de la selección de los tanques de combustible. Los tanques de combustible de fibra de vidrio dan por ejemplo mucho mejor resultado. Los de plástico se recomienda que cuenten con un recubrimiento interior fluorado para evitar filtraciones del producto. Además el biodiésel se puede dopar con antioxidantes para evitar el fenómeno de la oxidación y usar tanques metálicos.

Las soldaduras de plomo y revestimientos de zinc se deben evitar, al igual que las tuberías de cobre, reguladores de latón y accesorios de cobre, ya que el biodiésel no solo se ve afectado por entrar en contacto con el metal, sino que el propio metal sufre una corrosión más severa que con el gasóleo convencional.

### 3.4 La dilución del aceite.

El fenómeno conocido como dilución del aceite es que se produce cuando parte del combustible que entra en la cámara de combustión pasa a través de los segmentos de los pistones y alcanza el cárter, contaminando el aceite y haciendo que este pierda sus cualidades lubricantes. La dilución del biodiésel en el aceite lubricante es superior debido a la fracción no saturada de la cadena de ácidos grasos que se

encuentran en el biocombustible. Sin embargo pruebas realizadas a lo largo de los últimos años reflejan, como se puede ver en la tabla adjunta, que el desgaste sufrido en las piezas bañadas en aceite lubricante suele ser inferior utilizando biodiésel que gasóleo convencional. Es por esto que se puede afirmar que el uso de biodiésel es totalmente compatible con el aceite lubricante convencional. En estas pruebas comparativas sólo en el cobre se aprecia un superior desgaste, debido presumiblemente a la incompatibilidad de este material con los componentes del biodiésel que se ha diluido en el aceite lubricante [24].

| <b>Biodiésel</b> | <b>Desgaste aluminio</b> | <b>Desgaste cromo</b> | <b>Desgaste cobre</b> | <b>Desgaste hierro</b> | <b>Desgaste plomo</b> |
|------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| B100 Soja        | Inferior                 | Inferior              | Superior              | Inferior               | Inferior              |
| B50 Soja         | Inferior                 | Inferior              | Superior              | Inferior               | Inferior              |
| B20 Soja         | Inferior                 | Inferior              | Inferior              | Inferior               | Inferior              |
| B100 Colza       | Inferior                 | Inferior              | Superior              | Inferior               | Inferior              |
| B50 Colza        | Inferior                 | Inferior              | Superior              | Inferior               | Inferior              |
| B20 Colza        | Inferior                 | Inferior              | Superior              | Inferior               | Inferior              |
| B100 Palma       | Superior                 | Inferior              | Superior              | Inferior               | Superior              |
| B50 Palma        | Similar                  | Inferior              | Inferior              | Inferior               | Inferior              |
| B15 Palma        | Inferior                 | Similar               | Inferior              | Inferior               | Inferior              |

**Tabla 3-8: Desgaste de materiales en contacto con aceite lubricante de motor usado con biodiésel respecto a usado con gasóleo [24]**

## 4 MODIFICACIÓN DE UN MOTOR DIESEL PARA ADAPTARLO A BIODIÉSEL:

### 4.1 Nissan Patrol Top Line RD28T

#### *4.1.1 Historia. El Nissan Patrol en España.*

El lanzamiento del Nissan Patrol en España en 1983 marcó el inicio del uso del 4x4 como vehículo familiar en nuestro país. Supuso el nacimiento de un nuevo tipo de todoterreno más versátil, apto para algo más que el uso agrícola e industrial. Este nuevo concepto de Todoterreno derivó con el paso de los años hacia la filosofía SUV (Sport Utility Vehicle), que actualmente tiene un gran éxito como demuestran las cifras de ventas de modelos como el Nissan Qashqai o el Toyota Rav-4.

En enero de 1980 Massey Ferguson cedió el paquete de acciones que poseía de la empresa nacional Motor Ibérica S.A. a la empresa japonesa Nissan de fabricación de vehículos. Las buenas expectativas empresariales del mercado español propiciaron que dos años después la empresa japonesa decidiese ampliar su participación en Motor Ibérica S.A. y se convirtiese en el accionista mayoritario. El primer modelo que Nissan decidió comenzar a fabricar en las instalaciones que Motor Ibérica poseía en la Zona Franca de Barcelona fue conocido en otros países como Nissan Safari 160, que en España recibiría el nombre de Patrol 160, al que se le acoplaría el motor M27 de origen Perkins y fabricación nacional, destinado inicialmente a las furgonetas Ebro. De hecho estas primeras unidades se comercializaron bajo la marca Ebro.

Así nace el primer Patrol español, con un motor Diesel atmosférico de cuatro cilindros y 2.770cc, que daba 70 CV a 3.600 r.p.m. La estructura de este primer Patrol respondía al diseño tradicional de un todoterreno: bastidor de largueros y travesaños, suspensión por ejes rígidos y ballestas en ambos ejes, aunque con amortiguadores telescópicos de doble efecto que suponían una mejora sustancial en la comodidad; frenos de disco delante y tambor detrás, dirección de recirculación de bolas asistida y transmisión 4x4 conectable, con reductora y diferencial trasero de deslizamiento limitado.



**Figura 4-1: Ebro Patrol de motor Perkins.**

Hoy en día el equipamiento y acabados del Patrol pueden parecer espartanos, pero en sus orígenes no se veía así, y de hecho supuso uno de los motivos de su gran éxito comercial, pues superaba ampliamente a su directo rival, el conocido Land Rover Santana. Su velocidad máxima se situaba en unos aceptables, para la época, 115 km/h; que alcanzaba sin excesivas vibraciones en la cabina y su ligereza y economía en comparación con los exclusivos Range Rover o Mercedes G lo convirtieron en un vehículo muy popular.

Inicialmente se pusieron dos versiones a la venta: la de carrocería corta de 2 puertas con techo de fibra que podía ser sobreelevado o no, y la de carrocería larga de 4 puertas con techo elevado. Al año siguiente apareció la versión larga con techo bajo, y con capacidad para siete pasajeros. Estas primeras versiones del Patrol con motor Perkins, y se reconocen por su frontal de faros redondos y llantas de acero sin orificios de ventilación. Nissan empezó fabricando unas 15.000 unidades del Patrol al año, que se vendían no solo en España sino en todo el mercado europeo (allí sí bajo el nombre de Nissan). Pronto se fue diversificando la gama, con el objetivo de satisfacer las expectativas de un mayor número de clientes hasta el punto de que en 1989 se comercializaban dieciséis versiones diferentes de este vehículo.



**Figura 4-2: Nissan Patrol SD33**

El Patrol recibió su primera modificación en 1985, se incluyó una nueva parrilla, pasó a denominarse Nissan, los faros delanteros pasaron a ser cuadrados y se completó el equipamiento. También se sustituyó el motor M27 de origen Perkins por el A428 de 2.820cc y 76CV, diseñado en España, pero mucho más moderno. Se introduce así mismo la motorización SD33 de seis cilindros y origen japonés, que con 3.246cc proporcionaba 95 CV.

En 1987 Nissan comenzó a dar la opción de un motor de gasolina en sus versiones más equipadas, se trataba de un 6 cilindros en línea con 120 CV que proporcionaba al Patrol unas prestaciones dignas de una berlina de la época. Además, versiones turboalimentadas de las mecánicas Diesel fueron puestas a la venta. La de 4 cilindros y 2,8 litros, que se conocería como A428T alcanzaba los 95 CV, y la de 6 cilindros conocida como SD33T llegaría a los 110 CV.

El Patrol también tuvo su hueco en la competición, obteniendo cuantiosos éxitos tanto en los campeonatos nacionales como en los rallies africanos, incluyendo el popular París Dakar. Estos éxitos deportivos condujeron al lanzamiento de la versión Patrol Dakar TD, equipada con llantas específicas, dirección más directa, faldones, suspensión reforzada, rueda de repuesto en el maletero, aletines y faros de largo alcance.



**Figura 4-3. Nissan Patrol en competición**

La última gran renovación de la gama tuvo lugar en 1989. Se realizaron ligeros cambios estéticos y se renueva el motor de gasolina por otro, también de 6 cilindros, pero con 136 CV. Así mismo se sustituyen los motores Diesel SD33 y SD33T por los nuevos RD28 y RD28T, también de 6 cilindros y con potencias de 95CV y 115CV respectivamente. Éste último es el que es objeto de este proyecto y se montó en las unidades de la versión Patrol Top Line, la más equipada de la gama, que contaba con defensas, faros de largo alcance, aire acondicionado, elevalunas eléctricos, radiocasete y liberadores de rueda automáticos, entre otros.

Ese año, Nissan ya había vendido más de 70.000 unidades del Nissan Patrol, y se había convertido en líder del mercado nacional de todoterrenos. El Patrol no volvió a cambiar su aspecto hasta el año 1993, en el que llega al mercado español el Patrol GR. Hasta ese año, la gama Patrol permanece prácticamente inalterada, a excepción de algunas series limitadas como el Polaris, el Top Green, el Merca o el Dakar II. El nuevo Patrol GR era un coche muy distinto al primer Patrol. No sólo estéticamente hablando, también su parte ciclo, con una suspensión a base de muelles y amortiguadores, suponía un avance importante, aunque siguió contando con el motor RD28T.



**Figura 4-4: Nissan Patrol ultimas unidades**

La gama del Nissan Patrol normal quedó reducida entonces a las versiones básicas e industriales. En el año 1998 se incorporó la mecánica 2.7TD de 4 cilindros e inyección electrónica que rendía 100CV de potencia y provenía del Nissan Terrano II. Esta nueva motorización sustituyó a todas las demás y quedó como la única opción dentro de la gama. El último Nissan Patrol salió de la cadena de montaje de Motor Ibérica S.A. en Barcelona en el año 2001 [26].

#### *4.1.2 Aplicaciones militares*

El Nissan Patrol fabricado en España fue un duro competidor de los tradicionales Land Rover Santana a la hora de ser elegido como vehículo ligero polivalente para satisfacer las necesidades del Ejército Español y la Infantería de Marina.

De hecho en el año 1988, el Nissan Patrol ganó el concurso para ser elegido por el Ministerio de Defensa como nuevo vehículo para el parque móvil de las Fuerzas Armadas. Inicialmente el contrato con Nissan suponía la fabricación de 500 vehículos adaptados a las necesidades militares en un periodo de cinco años. Posteriormente el número de unidades fabricadas y destinadas a las Fuerzas Armadas fue muy superior pero el primer pedido ya representó un considerable empujón al éxito del modelo, ya confirmado en la vida civil.

Los primeros Patrol que Nissan diseñó para el ejército español se denominaron como MC-4 que son las siglas que representan “Militar Corto de 4 cilindros. Están basados en la versión de 2 puertas civil, o sea la que tenía el chasis de batalla corta de 4,10 metros de longitud. El motor el A428 de 4 cilindros atmosférico y 2.820cc, aunque en la versión militar se llevan a cabo ciertas modificaciones en la mecánica que le otorgan un poco más de potencia, llegando a la cifra de 81,6 CV. Se mantiene la caja de cambios de cinco velocidades y la transmisión 4x4 conectable con reductora y diferencial autoblocante.



**Figura 4-5: Nissan Patrol MC-4**

No obstante, las principales modificaciones de este modelo militar respecto a un Patrol de serie se centran en la carrocería, donde dependiendo del uso al que fuera a ser destinado el vehículo se le incorporaban diferentes características. Una de las más típicas era el parabrisas, que en la versión militar es abatible o bien se presenta en dos mitades, lo que permitía acoplar el cañón sin retroceso CSR. Otra modificación que permite distinguir muy fácilmente un Nissan Patrol militar de una unidad civil son los paragolpes delantero y trasero, menos estéticos pero mucho más robustos que los de la versión civil y que permiten unos mejores ángulos de ataque y salida. Accesorios tales como ganchos, faros de largo alcance, instalación eléctrica de 24 voltios, grúas, sirenas, cabestrante, defensas, depósitos de combustible sobredimensionados o toda clase de modificaciones y versiones de la carrocería que siguen las especificaciones de la OTAN eran así mismo instaladas en la fábrica de Motor Ibérica S.A. de la zona Franca de Barcelona previamente a la entrega al Ejército de España. Este modelo de Nissan Patrol militar se fabricó en versiones de techo lona abatible fácilmente y techo duro principalmente, aunque también se produjeron unidades de tipo Pick-Up que permitían diversas configuraciones de la caja trasera descubierta. Por último cabe destacar la fabricación de una serie de Patrol MC-4 que contaban con una caja de filtro de aire estanca y cuya toma salía por el lateral del capó hasta el techo, haciendo así de snorkel que permitía cumplir con las especificaciones de vadeo profundo que exigen las operaciones de la Infantería de Marina.

Posteriormente, el ejército de tierra solicitó la fabricación de una serie de unidades que permitiesen 1.000 kilos de carga útil para transporte de tropas y mercancías más pesadas. El Patrol MC-4 sólo alcanzaba los 700 kg., por lo que Nissan tuvo que diseñar un Patrol militar basado en el modelo de 4 puertas civil, o sea, sobre el chasis de batalla larga de 4,75 metros de longitud de carrocería. Dado que para transportar cargas tan pesadas el motor original A428 resultaba insuficiente, se optó por montar el recientemente estrenado por el modelo RD28 de 6 cilindros, en su versión atmosférica de 92CV. Recibió la denominación de ML-6, que son las siglas de referencia de “Militar Largo 6 cilindros”, y sus características lo hacían ideal no sólo para transportar carga, sino también personal. Este modelo, se fabricó principalmente en tres versiones: techo lona para cargas pesadas, pick-up y versión de 9 plazas para transporte de personal tanto con techo duro como con techo de lona.



**Figura 4-6: Nissan Patrol ML-6**

Los buenos resultados obtenidos de ambos modelos hicieron que con el paso de los años multitud de versiones de los Nissan Patrol fueran adquiridas para su servicio a las fuerzas armadas hasta el final de su fabricación. Muchos de estos Nissan Patrol aun hoy en día continúan prestando un excelente servicio en muchas aplicaciones dentro de los cuerpos y fuerzas de seguridad del Estado [27].

## **4.2 Motor Diesel RD28T**

### *4.2.1 Historia y versiones del motor*

El motor RD28 de Nissan está basado en el diseño de las anteriores mecánicas RB de Gasolina de la marca. La única diferencia en el diseño respecto a este, a parte, por supuesto de la diferencia de combustible es que solo se fabricaron con simple árbol de levas con culatas de 2 y 3 válvulas por cilindro, mientras que las versiones de gasolina sí existían con sistema de distribución de doble árbol de levas y culata de 4 válvulas por cilindro [28].



**Figura 4-7: Motor Nissan RD28**

El motor RD28 se diseñó para sustituir a dos motores que empezaban a pecar de antigüedad. El primero de ellos era el LD28 que, aparte de diversas aplicaciones industriales, se montaba en los turismos

emblemáticos de la marca como los Nissan Cedric y Gloria 430 e Y30, el Nissan Laurel C30 y C32, el Nissan Skyline C210 y R30 o la primera versión del Nissan Máxima denominada G910. Era un motor de 6 cilindros pero de concepción muy antigua cuya producción había comenzado en 1980 y que disponía de distribución mediante árbol de levas en el cárter con varillas y balancines [29]. Estaba construido enteramente en fundición de hierro y aunque la inferioridad en potencia respecto al posterior RD28 era pequeña, su funcionamiento era considerablemente peor en cuanto a suavidad, consumo y emisiones contaminantes. El otro motor que quedo desplazado por el nuevo RD28 fue el conocido SD33. Se trataba de un motor de 6 cilindros destinado al uso en camiones ligeros y furgonetas como fueron los Nissan C80 o el UD 3400, aunque también se instaló en las primeras generaciones de Nissan Patrol, en algunos otros turismos de otras marcas, como el Jeep CJ-10, e incluso tuvo aplicaciones marinas. Este motor, como el LD28 era un motor de concepción antigua, nacido en el año 1976, contaba con inyección indirecta mecánica con bomba lineal y un árbol de levas lateral con varillas y balancines en su sistema de distribución de dos válvulas por cilindro [29]. Incluso funcionaba con 24 voltios en su sistema eléctrico, algo común en los camiones pero que limitaba mucho su uso en turismos.

Nace así en el año 1989 el motor Nissan RD28, que en sus primeras series, cuenta con 2 válvulas por cilindro y se haya en dos versiones: atmosférico de 92 caballos de potencia a 4600rpm y turboalimentado (RD28T) de 115 caballos de potencia a 4400rpm. Se trata de un motor más moderno con un sistema de distribución con el árbol de levas en su culata de aluminio, así como un sistema de inyección que deja paso a la más moderna bomba rotativa en sustitución de la anacrónica anterior de tipo lineal [28]. Este motor en su versión atmosférica se instaló en el último año del Nissan Skyline R31, los Nissan Laurel de las series C32 a C34, los Nissan Cedric y Gloria de las series Y30 a Y32, el Nissan Crew K30 y por supuesto el Nissan Patrol.



**Figura 4-8: Nissan Laurel**

La versión turboalimentada únicamente se montó en los Nissan Patrol y Nissan Patrol GR Y60 [29]. Esta versión, además de contar con un sistema de turbocompresor, contaba con unas bielas reforzadas, unos eyectores de aceite de lubricación en la cabeza de los pistones que los refrigeraban y un radiador de aceite lubricante que mejoraba la refrigeración [28]. Esto era un factor crítico en los motores RD28, pues la salida del refrigerante del bloque motor se encontraba entre el cuarto y el quinto cilindro, lo que provocaba que alrededor del sexto el refrigerante fluyese con mucha menos velocidad, provocando un sobrecalentamiento del mismo que en muchas ocasiones conllevaba quemar la junta de culata. Este

motor solo la conocimos en España montado en los Nissan Patrol y Nissan Patrol GR Y60, pues el resto de modelos en los que fue instalada nunca fueron importados a nuestro país.

En 1991 se incorporó una versión que poseía 3 válvulas por cilindro, dos de admisión y una de escape. Este modelo estaba destinado a los turismos Nissan Cedric y Gloria Y32 e Y33 y Nissan Laurel C34 y C35. La versión de 3 válvulas por cilindro incrementaba su potencia hasta los 96.5 caballos al ser capaz de subir más de revoluciones, entregando esta potencia a unas nada despreciables 4800rpm [29]. Incluso hoy en día es un régimen de giro muy elevado para una mecánica de ciclo Diesel. Esta mecánica tampoco vio nunca el mercado español.

La siguiente modificación introducida en el motor Nissan RD28 fue la inclusión de inyección electrónica. Se perdió de nuevo la culata de 3 válvulas por cilindro y se volvió a la anterior de 2. Hubo dos versiones, una atmosférica (RD28E) de 101 caballos de potencia a 4600rpm y otra con turbocompresor (RD28ETi) de 130 caballos de potencia a 4400rpm, que además del sistema de inyección electrónica contaba con un sistema de post-enfriado o intercooler en su sistema de admisión turboalimentada. La versión atmosférica nunca llegó a ningún modelo español, sin embargo fue la más longeva. Se montó en los Nissan Laurel C35 hasta el año 2002, y en los Nissan Crew K30 hasta el año 2004 [29]. La versión con turbocompresor fue exclusiva del Nissan Patrol GR Y61 hasta el año 2001, momento en el que fue sustituida por la mucho más moderna de diseño y concepción mecánica 3.0 Di de 4 cilindros y 158cv.



**Figura 4-9: Nissan Patrol GR Y61 RD28ETi**

Sin embargo, hoy en día esta mecánica cuenta con un reconocido prestigio de fiabilidad y buen rendimiento. No es para menos teniendo en cuenta que aún hoy en día, sobre todo en zonas rurales, se pueden ver Nissan Patrol con esta mecánica bajo su capó rodando por las carreteras españolas con más de 25 años y cientos de miles de kilómetros en su marcador. Esto tiene como consecuencia que haya infinidad de modificaciones y preparaciones sobre la base de esta mecánica, incluso no es extraño que algunos preparadores del todoterrenos extremos como el Jeep Wrangler opten por realizar instalaciones de esta mecánica en sustitución de las originales de aquellos vehículos que modifican.

#### 4.2.2 Características Técnicas

| Característica                        | Dato                                                                                                         |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nº de cilindros                       | 6                                                                                                            |
| Disposición                           | En línea longitudinal                                                                                        |
| Diámetro del cilindro x Carrera       | 85x83mm                                                                                                      |
| Cilindrada                            | 2826cc                                                                                                       |
| Relación de Compresión                | 21.2:1                                                                                                       |
| Potencia Máxima DIN                   | 115CV                                                                                                        |
| Potencia Máxima ISO                   | 84.5kW                                                                                                       |
| Régimen de Potencia Máxima            | 4400rpm                                                                                                      |
| Par Máximo DIN                        | 23Kg·m                                                                                                       |
| Par Máximo ISO                        | 235N·m                                                                                                       |
| Régimen de Par Máximo                 | 2400rpm                                                                                                      |
| Culata                                | Culata de aleación de aluminio con asientos, guías de válvulas y precámaras de combustión insertadas.        |
| Sistema de distribución               | Simple árbol de levas en cabeza, arrastrado desde el cigüeñal por correa dentada.                            |
| Válvulas                              | 2 por cilindro, inclinadas 45° y con dos muelles de retorno                                                  |
| Empujadores                           | Hidráulicos de acero                                                                                         |
| Cigüeñal                              | De fundición sobre 7 apoyos                                                                                  |
| Pistones                              | De aleación de aluminio con cabeza refrigerada por un surtidor de aceite.                                    |
| Segmentos                             | Uno de fuego, uno de compresión y uno rascador                                                               |
| Lubricación                           | A presión por bomba de aceite de engranaje interior movida directamente desde el cigüeñal                    |
| Capacidad de Aceite.                  | 6.7 litros                                                                                                   |
| Refrigeración                         | Líquida con 12 litros de capacidad. Radiador de aceite para el lubricante                                    |
| Apertura del termostato               | A los 82°C. Apertura máxima con 90°C                                                                         |
| Capacidad del depósito de combustible | 82 litros                                                                                                    |
| Sistema de alimentación               | Inyección indirecta con precámara. Bomba rotativa de regulador mecánico movida por la correa de distribución |
| Turbocompresor                        | Garrett TB2527. Presión de 0.853 a 0.906 bar                                                                 |

**Tabla 4-1: Características técnicas motor Nissan RD28T [28]**

### 4.2.3 Determinación del consumo de Combustible:

Para determinar el consumo de combustible de la unidad en concreto de Nissan Patrol Top- Line RD28T de la que se dispone para la realización del presente proyecto, se recurrió a una tabla de consumo que el propietario llevó a cabo en el año 2005 a fin de determinar dicho parámetro, que resulta imprescindible para saber de manera aproximada el flujo de combustible que se deberá calentar para llevar a cabo la adaptación del motor al biodiésel puro.

La inexistencia de datos homologados del consumo del vehículo debido a su antigüedad es lo que hace que estos datos del propietario del mismo sean los datos más fiables con los que se puede contar para el presente proyecto. Cabe destacar que la diversidad de estaciones de servicio visitadas permite despreciar los posibles errores de medida de los surtidores. No obstante sigue existiendo un error de medida del cuentakilómetros del vehículo, que comprobado mediante GPS se ha determinado entorno a un 10% en exceso, y se ha tenido en cuenta para la determinación del consumo.

Si bien es cierto, que como se ha expuesto antes en este mismo proyecto, el consumo es un dato muy variable incluso entre unidades del mismo modelo, ya que se ve muy afectado por los estilos de conducción de cada usuario, estado mecánico del vehículo y zona de operación entre otros. Sin embargo se han comprobado los datos obtenidos y contrastado con diversos foros de internet sobre el modelo, concluyéndose que los resultados del propietario coinciden bastante con las informaciones reportadas por otros propietarios.

| Fecha                   | Kilómetros | Estación de Servicio   | Litros | Importe (€) | €/litro | kms del depósito | Consumo |
|-------------------------|------------|------------------------|--------|-------------|---------|------------------|---------|
| 05-mar-2005             | 127.235    | Repsol Hoyo de Pinares | 47,00  | 39,67       | 0,83    | 393              | 12,0    |
| 20-mar-2005             | 127.628    | Repsol CM3133          | 42,20  | 36,00       | 0,84    | 346              | 12,2    |
| 23-mar-2005             | 127.974    | Repsol Venta Cavila    | 36,30  | 31,00       | 0,84    | 304              | 11,9    |
| 27-mar-2005             | 128.278    | Repsol La Gineta       | 45,90  | 39,14       | 0,84    | 374              | 12,3    |
| 07-may-2005             | 128.652    | Carrefour-Pinar        | 50,02  | 41,32       | 0,83    | 403              | 12,4    |
| 07-ago-2005             | 129.055    | Carrefour-Pinar        | 53,49  | 46,80       | 0,87    | 393              | 12,0    |
| <b>Totales y medias</b> | 1820       |                        | 274.91 | 233.93      | 0.84    | 364              | 12.2    |

Tabla 4-2: Determinación del consumo medio

## 4.3 Sistema de alimentación de biocombustible

### 4.3.1 Esquema del sistema de combustible y modificaciones.

En el anexo II [30] figuran todos los componentes del sistema de Combustible. En el siguiente esquema básico figuran los elementos que lo constituyen en términos generales, entre los que figuran aquellos que resultarán modificados tanto para climas cálidos como para climas fríos. Entenderemos por clima cálido aquellas zonas donde no se alcanza la temperatura de congelación del biodiésel que se vaya utilizar, y como clima frío aquella en la que existe riesgo de congelación del biocombustible en el interior del circuito. Se ha decidido hacer esta distinción a fin de tener en cuenta que en aquellas zonas donde no

se alcanzan nunca las temperaturas de congelación del combustible, se puede llevar a cabo una modificación francamente más económica que en aquellas zonas donde por sus extremas temperaturas es muy probable que el combustible se solidifique en el interior del circuito. Los esquemas detallados de ambas instalaciones figuran en el anexo I.

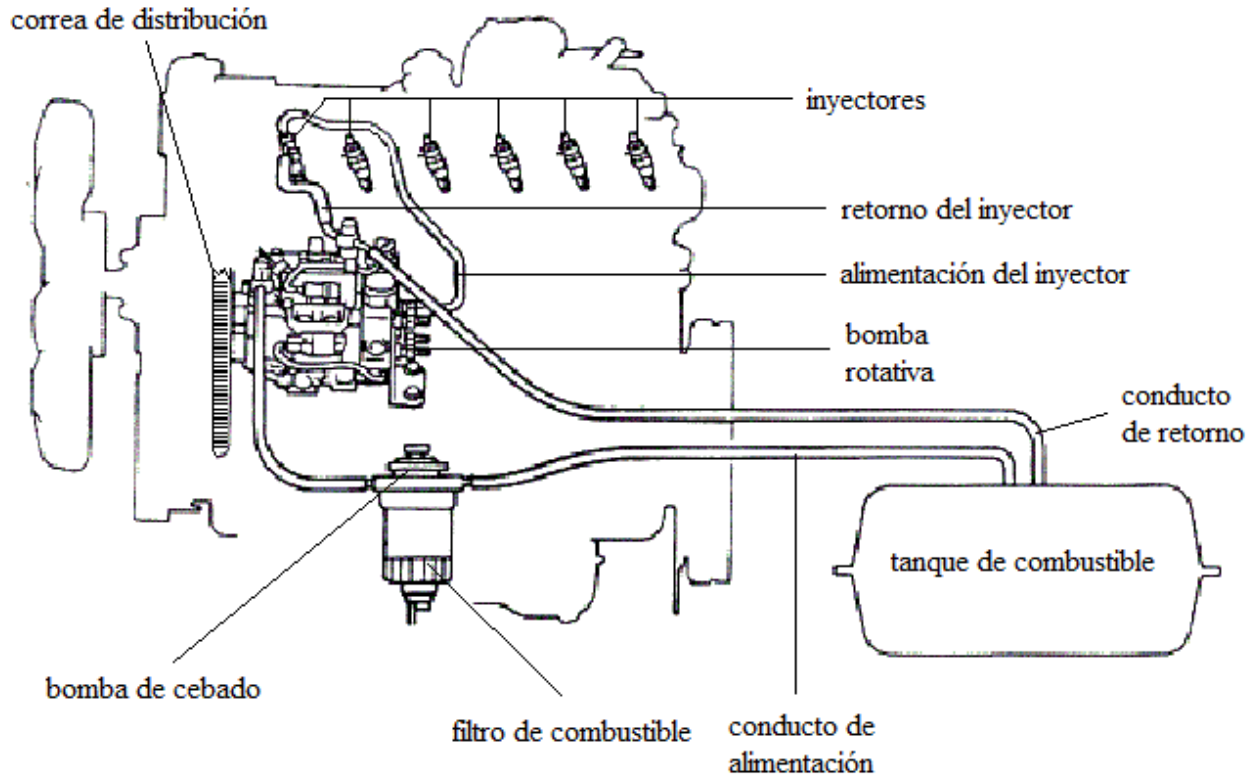


Figura 4-10: Sistema de Combustible RD28T simplificado

#### 4.3.1.1 Modificaciones para climas fríos

- **Tanque de combustible:** Se le colocará un calentador adhesivo de 1000w que funciona con corriente alterna de 220v. Este calentador solo se puede colocar gracias a que el depósito de combustible de este modelo es metálico, de ser de plástico no sería posible. La finalidad de esta pieza es que en caso de temperaturas extremadamente bajas, que pudieran congelar el combustible en el interior del depósito por no haberse añadido el aditivo correspondiente o por haber resultado éste ineficaz, el coche pueda ser conectado a la corriente alterna de un edificio y el calentador descongele el combustible del interior en un plazo de tiempo aceptable. Dicho plazo de tiempo depende de la formula

$$t(T) = \frac{l \cdot \rho \cdot Q}{P} \cdot T$$

Donde:

- $t(T)$  es el tiempo que hace falta esperar por grado centigrado que haga falta elevar el biocombustible para alcanzar su punto de descongelación.
- $l$  es la cantidad de combustible en la fórmula.
- $\rho$  la densidad del aceite vegetal, que depende de la procedencia del biocombustible en cuestión pero que se sitúa en torno a 0.91Kg/l

- $Q$  es el calor específico del aceite vegetal, que igualmente depende de la procedencia pero se sitúa en un promedio de 2000 J/Kg
- $P$  es la potencia del calentador, en este caso de 1000w.
- $T$  es el número de grados centígrados que se ha de elevar el biocombustible para que alcance su punto de descongelación.

Así, resolvemos que para un depósito lleno, harán falta 2 minutos y medio aproximadamente para elevar la temperatura 1°C. Como ejemplo se supone que si el biocombustible fuese biodiésel procedente de aceite de girasol (que se congela a 0°C) y se encontrase a -3°C congelado en el depósito, y teniendo en cuenta el calor latente que hace falta aplicar para el cambio de fase, en menos de 10 minutos sería posible poner en marcha el vehículo.

- **Conductos:** Aunque los originales de Poliuretano en principio sólo sufrirían una degradación leve, a fin de llevar a cabo la modificación con garantías de éxito a largo plazo, todos los conductos serán sustituidos por unos de Nylon, que resulta perfectamente compatible.
- **Conducto de alimentación:** Será sustituido por un conducto calefactado que funciona con 12v y proporciona 500w de potencia para calentar el combustible alimentándose del alternador y las baterías del coche. Dicho calentador contará con un termostato con un sensor en el sistema de refrigeración del vehículo que hará que cuando éste alcance su temperatura óptima de funcionamiento el calentador del conducto se desconecte. Esto es así porque también se va a incluir un segundo calentador en esta zona del circuito, que no es más que un intercambiador de calor entre el agua del refrigerante y el combustible que posee una válvula de bypass que será controlada por el mismo termostato que el conducto calefactado y cuya misión es evitar que el combustible circule a través de el mismo cuando el refrigerante del vehículo aún no ha alcanzado la temperatura de funcionamiento. Como se aprecia en las características del Nissan Patrol RD28T, este vehículo abre el termostato a 85°C. Una vez abierto la temperatura de su circuito de refrigeración oscilará presumiblemente entre los 85°C y los 120°C, un rango de temperaturas muy adecuado para llevar a cabo el calentamiento del aceite vegetal. De esta manera en cuanto el vehículo ha alcanzado la temperatura de funcionamiento el termostato instalado en el circuito de refrigeración desconectará el calefactor del conducto de alimentación y no será necesario invertir energía eléctrica en el calentamiento del combustible. Para saber si el calentador eléctrico resultará suficiente para elevar la temperatura del biocombustible, recurrimos a la ecuación:

$$F = \frac{P \cdot 3600}{Q \cdot T \cdot \rho}$$

Donde  $F$  es el flujo de combustible máximo expresado en l/h q se puede calentar y  $T$  es la temperatura que se debe alcanzar, en este caso 80°C

Resolviendo la ecuación obtenemos que el máximo flujo admisible es de 12.36l/h, que resulta suficiente para los consumos de este motor.

- **Circuito de Refrigeración:** se incluirá una derivación del circuito mediante un conector al circuito principal que desvíe una parte del refrigerante y lo haga pasar por el calentador de combustible, además se incluirá el mencionado termostato que apague el calentador eléctrico del conducto de alimentación y accione la válvula del intercambiador de calor.
- **Filtro de Combustible:** Se cambiará su ubicación a una más próxima a la bomba de inyección a fin de reducir la posibilidad de congelación del conducto que une el filtro con la bomba de combustible y que no irá calefactado. Además se le colocará al filtro de combustible un forro calefactado específico que estará destinado a calentar el filtro en caso de temperatura extremadamente fría que haya podido solidificar el combustible en su interior. Dicho calentador se basa en el mismo principio de funcionamiento que el calentador del tanque de combustible, es decir, una lona de silicona calefactada que rodea el filtro de combustible. Funciona con 220v y proporciona una potencia de 240w. Existen versiones de 12v y diferente potencia, no obstante en el presente proyecto, y dado que la batería del vehículo ya sufre considerablemente proporcionando energía el conducto de alimentación calefactado, se ha decidido que el calentador del filtro funcione junto con el calentador del tanque de combustible cuando sea preciso su utilización por congelamiento del combustible en temperaturas extremas.

#### 4.3.1.2 Modificaciones para climas cálidos

- **Conductos:** Al igual que en la modificación para climas fríos todos los conductos originales de Poliuretano serán sustituidos por unos compatibles con el biocombustible fabricados en Nylon.
- **Conducto de alimentación:** Le serán incluidos dos calentadores de combustible. El más cercano al filtro de combustible será el calentador primario, que como en el caso de la modificación para climas fríos será un intercambiador de temperatura entre el biocombustible y el circuito de refrigeración del vehículo. Dicho intercambiador de temperatura contará con una válvula de bypass que evita que el combustible circule por el mismo cuando el refrigerante se encuentra más frío que el biocombustible, es decir, antes de alcanzar el régimen de funcionamiento. Esta válvula será controlada por un termostato con un sensor en el circuito de refrigeración del vehículo. Por otro lado, el más cercano al tanque de combustible será un calentador de 500w que funciona con 12v de corriente continua. Con esta potencia podemos llevar hasta la temperatura adecuada de operación un flujo de combustible adecuado para los consumos del motor que se sitúa en un máximo de 12.36 l/h, como se justifica con la fórmula:

$$F = \frac{P \cdot 3600}{Q \cdot T \cdot \rho}$$

El calentador eléctrico irá conectado al mismo termostato que el calentador primario solo que en esta ocasión el objetivo es que cuando el motor esté en su temperatura óptima de funcionamiento el calentador se desconecte, ya que el

combustible se estará calentando en el calentador primario de intercambio de calor y así se evita el consumo de energía eléctrica cuando el motor se encuentra en condiciones óptimas de operación.

- **Circuito de Refrigeración:** Al igual que en la modificación destinada a climas fríos, se incluirá una derivación del circuito mediante un conector al circuito principal que desvíe parte del refrigerante y lo haga pasar por el calentador primario de combustible. Así mismo, se incluirá el termostato que apague el calentador eléctrico y accione la válvula del calentador primario.

#### 4.3.2 Componentes

##### 4.3.2.1 Componentes para ambos climas

- **Conductos de nylon:** Para los conductos de nylon recurriremos a la empresa NIOCO española de reconocido prestigio y calidad. Fabrica tubos de nylon PA-11 y PA-12 flexible con diámetros comprendidos entre los 3mm y los 90mm, abarcando por tanto todos los diámetros de los conductos de combustible del Nissan Patrol. Aseguran unas temperaturas de utilización óptimas comprendidas entre -35°C y 100°C con usos ocasionales de 120°C y punto de quebrado por congelación a -70°C. Las presiones de utilización se garantizan hasta 10 Bares como mínimo y son conductos que ofrecen una gran resistencia a la abrasión, rotura o fisura por vibraciones en motores. Por todo esto se consideran óptimos para el proyecto que se plantea.



Figura 4-11: Tubos de Nylon NIOCO

- **Termostato:** Se recurre al termostato electrónico de Electroauto 90T0026 por ser un termostato electrónico pensado para su uso en automóviles, por lo que se garantiza un correcto desempeño pese a las vibraciones, efectos climatológicos como el agua y el frío o variaciones de temperatura que puedan tener lugar en el interior del capó de un coche. Se trata de un termostato regulable en su temperatura de actuación pensado para funcionar con corriente continua de 12v.

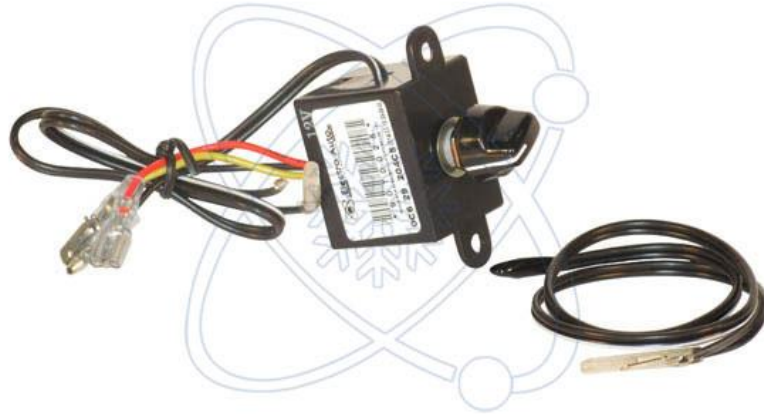


Figura 4-12: Termostato Electroauto 90T0026

#### 4.3.2.2 Componentes para climas fríos

- **Calentador de depósito:** Se trata de un calentador que se adhiere mediante adhesivo 3M a la superficie del depósito en este caso de la empresa KEENOVO. Proporciona una potencia de 1000w y funciona con corriente alterna de 220v. Queda instalado de manera permanente en el vehículo y basta con enchufarlo a la corriente alterna para que caliente el depósito y su contenido.



Figura 4-13: Calentador de depósito

- **Tubo de Alimentación:** se ha escogido el modelo “Thermoline™ In-Fuel-Line Heater” de la marca Parker Racor, versión Heater500 12v. Se trata de un conducto de combustible apto para biodiésel y calefactado. Proporciona 500w de potencia y funciona con alimentación de 12v. Sus 3.05m de longitud lo hacen suficiente para sustituir la mayor parte de la línea de combustible entre el depósito y el calentador primario de combustible por intercambio de calor con el líquido refrigerante. La empresa Artic Fox también dispone de un conducto de combustible calefactado, considerablemente más económico, no obstante especifica que no se utilice con concentraciones superiores a B20, debido a que

se basa en un filamento de cobre que atraviesa el tubo longitudinalmente y se lleva a incandescencia cuando lo atraviesa la corriente eléctrica. El modelo de Parker Racor no tiene cobre en contacto con el biodiésel, ya que lo que se calientan son las paredes del tubo.



Figura 4-14: Parker Racor Thermoline™ In-Fuel-Line Heater500 12v

- **Calentador de combustible por intercambio de calor con el líquido refrigerante:** Recurrimos de nuevo a la empresa Parker Racor que con su modelo “Nomad™ Coolant Heat Exchanger” modelo 320HTR4T nos proporciona un intercambiador de calor entre el combustible y el refrigerante que tiene la ventaja de que su diseño, en el que el agua del refrigerante rodea el conducto de combustible, deja muy poca zona de combustible a la exposición del frío cuando el motor está parado, reduciéndose así el riesgo de solidificación. Además se caracteriza por tener una válvula interna que se puede regular mediante termostato y permite al combustible hacer un bypass al intercambiador de calor para evitar que cuando el refrigerante todavía está frío y el combustible viene caliente de la línea calefactada, el intercambiador de calor funcione de manera adversa, es decir, refrigerando el combustible.



Figura 4-15: Parker Racor Nomad™ Coolant Heat Exchanger 320HTR4T

- **Calentador del filtro de combustible:** Para el calentador del filtro de combustible volvemos a recurrir a la empresa KEENOVO que nos proporciona un calentador de filtro de similar funcionamiento al calentador de depósito. Se trata de una lona de silicona calefactada que se coloca rodeando el filtro de

combustible con dos bridas y transmite 240w de potencia al filtro de combustible para descongelar el combustible en su interior. Funciona con 220v e irá conectado al mismo circuito que el calentador del tanque de combustible para que funcionen simultáneamente cuando se haya producido congelamiento del combustible.

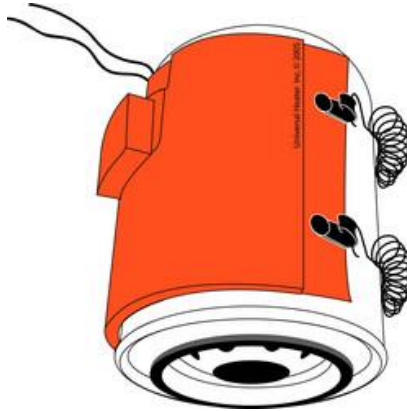


Figura 4-16: Calentador de filtro de combustible

#### 4.3.2.3 Componentes para climas cálidos

- **Calentador de combustible Eléctrico:** Se escoge un calentador de combustible eléctrico nuevamente de la empresa Parker Racor, por ser la única que proporciona un calentador eléctrico para la línea de combustible que proporcione los necesarios 500w de potencia para el consumo del motor RD28T del presente proyecto. El modelo es el “Nomad™ Electric Heater 14257”. En motores con un consumo inferior, en el que el flujo de combustible sea más bajo, podrían instalarse calentadores en torno a los 300w de los que hay una mayor oferta en el mercado, y con un inferior precio.



Figura 4-17: Parker Racor Nomad™ Electric Heater 14257

- **Calentador de combustible por intercambio de calor con el circuito de refrigeración:** En esta ocasión recurrimos a la empresa Artic fox para este componente. Su modelo “Midranger™ & Linehauler™ I-705B” dispone de la necesaria válvula de bypass para el combustible, aunque en este caso el principio de funcionamiento es más simple, pues en este intercambiador tanto el refrigerante como el combustible circulan longitudinalmente y el sistema de

bypass, como se aprecia en la fotografía, no es más que un conducto paralelo conectado a una válvula que selecciona si el combustible circula por el intercambiador o por el circuito paralelo. Esto lo hace inapropiado para climas fríos, donde el hecho de disponer de un largo tubo expuesto a la congelación se debe evitar todo lo posible. La válvula de bypass será controlada mediante el termostato ubicado en el circuito refrigerante del vehículo y que desconecta el calentador eléctrico.



**Figura 4-18: Artic Fox Midranger™ & Linehauler™ I-705B**

### 4.3.3 Presupuesto

Para realizar el presupuesto se ha recurrido a precios de componentes obtenidos en diversas páginas web. La mano de obra se ha estimado en base a otras instalaciones similares realizadas en diversos talleres consultados, y su precio se ha basado en el estudio realizado por el Instituto Nacional de Estadística que fue realizado en el año 2015 y estableció un promedio de 40,67€/h en España.

| Artículo                                            | Precio          |
|-----------------------------------------------------|-----------------|
| Calentador de depósito Keenovo.                     | 133€            |
| Parker Racor Thermoline™ In-Fuel-Line Heater500     | 894.47€         |
| Parker Racor Nomad™ Coolant Heat Exchanger 320HTR4T | 371.13€         |
| Calentador de filtro Keenovo                        | 36.03€          |
| Electroauto 90T0026                                 | 26€             |
| Tubos de Nylon Nioco                                | Aprox. 45€      |
| Material vario (tornillos, arandelas...)            | Aprox. 20€      |
| Mano de obra 5h                                     | 203.35€         |
| <b>TOTAL</b>                                        | <b>1728.98€</b> |

**Tabla 4-3 Presupuesto para climas fríos**

MODIFICACIÓN DE UN MOTOR DIESEL PARA SU FUNCIONAMIENTO  
CON ACEITE VEGETAL

| <b>Artículo</b>                              | <b>Precio</b>  |
|----------------------------------------------|----------------|
| Parker Racor Nomad™ Electric Heater<br>14257 | 330€           |
| Artic Fox Midranger™ & Linehauler™<br>I-705B | 274.30€        |
| Electroauto 90T0026                          | 26€            |
| Tubos de Nylon Nioco                         | Aprox. 45€     |
| Material vario (tornillos, arandelas, etc.)  | Aprox. 20€     |
| Mano de obra 3.5h                            | 142.35€        |
| <b>TOTAL</b>                                 | <b>837.65€</b> |

**Tabla 4-4 Presupuesto para climas cálidos**



## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

La revisión bibliográfica de diversos trabajos publicados anteriormente, y comentados en la presente memoria, muestran que el combustible de origen vegetal es perfectamente apto para ser utilizado en mecánicas inicialmente diseñadas para funcionar con gasóleo derivado del petróleo. No obstante, no quedaba tan claro cuáles son las consecuencias o problemas derivados del uso de este tipo de combustibles, ni cuáles deberían ser las modificaciones a realizar en un motor Diesel, a fin de hacer el vehículo apto para el consumo de biodiésel en todas las circunstancias y climas en los que este pudiera verse obligado a funcionar.

Este proyecto presenta un sistema viable para la adaptación de ciertos motores Diesel al uso de este tipo de combustibles. Con un presupuesto no excesivamente elevado se puede llegar a independizar totalmente las mecánicas Diesel del petróleo, una fuente de energía cada vez es más escasa, no renovable y muy contaminante. Esta independencia no está condicionada al clima ni a las estaciones del año, con un diseño como el que este proyecto ha dejado patente la independencia es total, y se puede utilizar el biocombustible en cualquier situación.

Resulta especialmente llamativo como se podría realizar esta modificación con elementos y equipos considerablemente económicos ya disponibles en el mercado, sin necesidad de complejos y costosos diseños que encarezcan las modificaciones hasta el punto de no hacerlas rentables.

Así mismo concluimos de la realización del proyecto que se puede prescindir del proceso de transesterificación al que se somete gran parte del biodiesel comercial a fin de asemejar sus propiedades a las del gasóleo convencional. Con una modificación que proporcione el suficiente aumento de la temperatura se puede usar aceite vegetal sin transesterificar sin problema alguno, lo que abarata el coste de producción del biodiesel de manera considerable. Dicho aceite vegetal podría además, en teoría, ser obtenido mediante reciclaje de aceite usado, con lo que no solo se abaratan los costes del combustible para el motor, sino que además se encuentra una nueva vía de reciclaje para todo el aceite vegetal utilizado en industrias como la hostelería, y que en estos momentos representa un problema al que es complicado encontrarle solución. Podríamos por tanto concluir que el proyecto podría ser rentable a corto plazo, lo que elimina la actual polémica sobre la rentabilidad económica de llevar a cabo este tipo de modificaciones, teniendo en cuenta que el biodiésel transesterificado tiene un precio de venta al público muy similar al gasóleo tradicional e incluso a veces superior.

## 5.2 Líneas Futuras

Múltiples son las líneas de investigación que se pueden proponer a raíz de este proyecto. La primera y probablemente más evidente es la de llevar el propio proyecto a la práctica para poder demostrar la viabilidad del mismo, así como realizar diversas pruebas de emisiones, consumo y rendimiento, para determinar los efectos en el rendimiento del motor que se puedan derivar de la modificación del motor y del uso de biodiésel no transesterificado, como combustible en esta mecánica. Las pruebas sobre un motor comercial se podrían llevar a cabo en los distintos climas en los que podría trabajar. Además, se podría completar el estudio sometiendo al motor a una prueba de larga duración, para luego proceder a su despiece para revisar todos sus componentes mecánicos.

Otra línea de investigación derivada del proyecto está basada en biodiésel un estudio más exhaustivo de las diversas fuentes de las cuales puede obtenerse los diferentes tipos de biodiésel, así como sus costes de obtención (por transesterificación o por otros métodos). Cobra especial importancia en esta vía de investigación la determinación exacta de las posibilidades que tiene el aceite usado para su uso como biocombustible, incluyendo los procesos y transformaciones a los que deba ser sometido dicho aceite para hacerlo apto para su utilización en motores Diesel.

Las posibilidades de adaptación al biodiésel de otro tipo de motores como pueden ser los destinados a buques e industria también necesita de un exhaustivo estudio. Esto cobra especial importancia cuando se habla de posibles aplicaciones militares, ya que la mayoría de las mecánicas utilizadas en el ejército son de ciclo Diesel, pero no todas ellas son de las mismas características que la mecánica Nissan RD28T del Nissan Patrol utilizado para este estudio.



**Figura 5-1: Nissan Patrol Top-Line objeto del presente proyecto.**

Las necesidades de investigación en materia de nuevos biocombustibles se extiende también a las mecánicas de ciclo Otto y a las turbinas. Ya se están realizando múltiples estudios para encontrar combustibles de origen vegetal y renovable que puedan ser aplicados sobre este tipo de mecánicas sin necesidad de modificaciones importantes, análogamente a lo que ocurre con el aceite vegetal y el motor de ciclo Diesel. Ya a día de hoy se están realizando pruebas con diversos tipos de gases así como bioetanol, pero continúa siendo muy necesario profundizar en la materia, aunque la menor popularidad de estas mecánicas cuando se trata de situaciones de uso prolongado hace que las empresas estén menos dispuestas a investigar en esta rama.

Sin embargo sí que resulta muy interesante la investigación en mecánicas de ciclo Diesel con los complejos sistemas de combustible actuales. El estudio bibliográfico llevado a cabo en este proyecto ha revelado que ya se han realizado con éxito experimentos de uso de biodiesel puro en motores con common-rail, no obstante las modificaciones a realizar en este tipo de motores así como las posibilidades de adaptación al biocombustible de motores que lleven instalados los actuales filtros antipartículas o depósitos de urea necesitan de un estudio más exhaustivo.

La polémica existente sobre el uso de biocombustibles de origen vegetal también puede plantear una nueva vía de investigación que debe tenerse en cuenta. Como se ha expuesto en el presente trabajo, hay expertos que consideran que desarrollar nuevas zonas de cultivo o destinar parte de las ya existentes a la producción de biocombustibles, puede tener un efecto negativo. En primer lugar existe la idea de que encarecerá los productos destinados al consumo humano, ya que al existir menos zonas de cultivo alimenticio, estos productos verán disminuida su tasa de producción. Esto puede llevar a un incremento del precio de los alimentos. Por lo tanto, el estudio de los posibles incrementos de precio es un factor importante en la implantación de este tipo de cultivos para esta finalidad.

Así mismo el impacto medioambiental y económico que previsiblemente tendrá lugar a raíz de la implantación de las nuevas zonas de cultivo energético también debe ser estudiado, así como las diferentes formas que puedan existir de hacerlo viable y que el precio final para el usuario sea aceptable. Esta forma de producción de combustible significaría multitud de puestos de trabajo, aunque también implica un decremento en la producción petrolífera. Además conviene determinar geográficamente donde sale más rentable llevar a cabo la producción y estudiar la rentabilidad del cambio general al nuevo combustible en función de los diversos países.



## 6 BIBLIOGRAFÍA

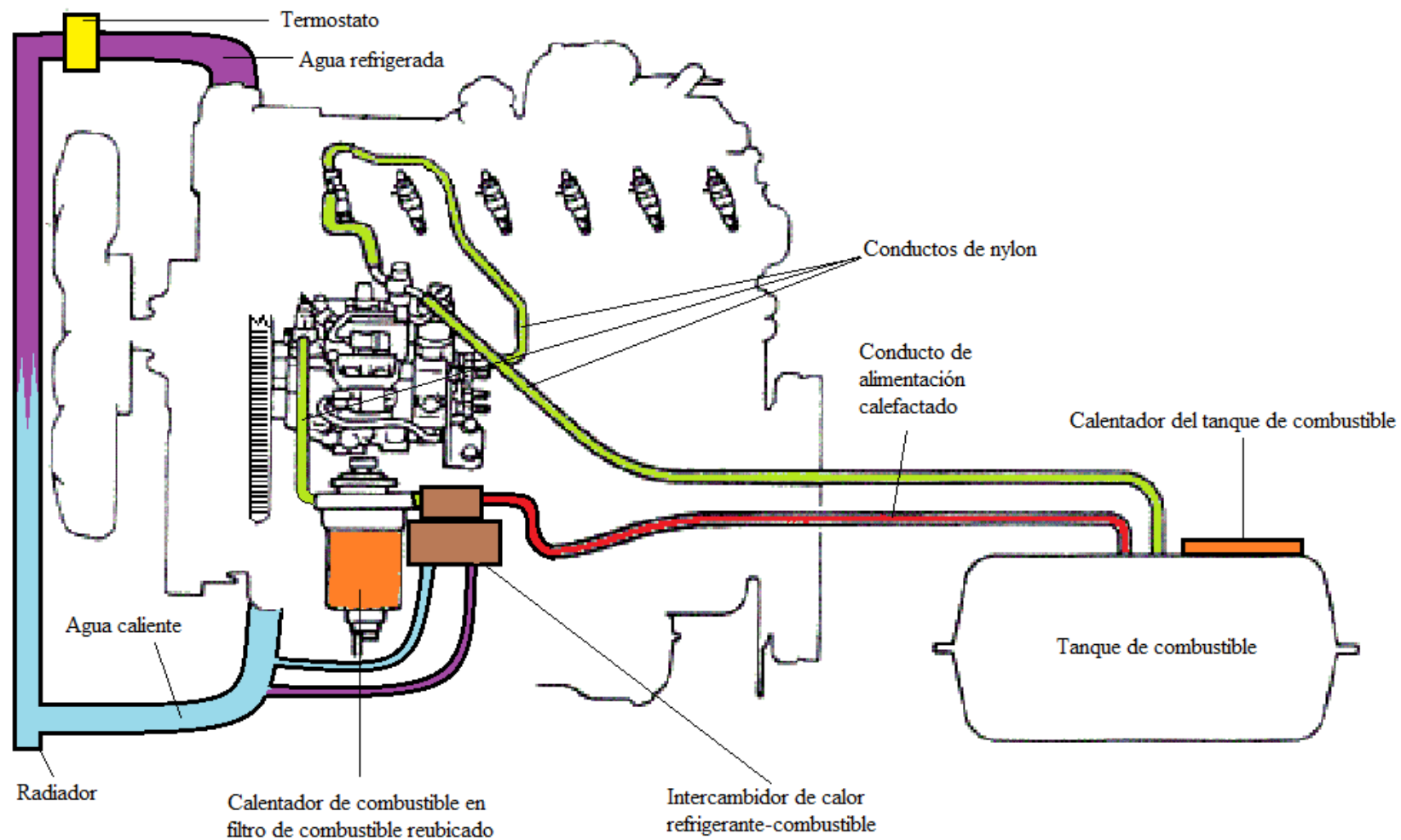
- [1] J. Cruz Gómez, «Sistema de Inyección common rail del motor TDI 3.01 V6 de Volkswagen,» 2013.
- [2] J. Costas, «Hace 75 años apareció el primer Mercedes diesel,» *motorpasión*, 17 Enero 2011.
- [3] «New Powertrain Technologies Conference,» *Automotive News*.
- [4] E. Cano, «Cada año 150.000 se equivocan al elegir coche Diesel o gasolina,» *ABC*, 22 Septiembre 2014.
- [5] «El Diesel en competición,» *El Mundo*, 19 Junio 2006.
- [6] M. Á. Á. Feijoo, *Apuntes de Maquinas y Motores Navales*, 2014.
- [7] D. Ullauri, Estudio de factibilidad para la construcción de un banco de pruebas para inyectores del sistema Common Rail Bosch.
- [8] «Diccionario de El Mundo,» El Mundo, [En línea]. Available: <http://www.elmundo.com.ve/diccionario/gasoil.aspx>. [Último acceso: 19 Enero 2016].
- [9] «Diccionario Motorgiga,» Motorgiga, [En línea]. Available: <http://diccionario.motorgiga.com/diccionario/gas-oil-definicion-significado/gmx-niv15-con194275.htm>. [Último acceso: 19 Enero 2016].
- [10] «Desguaces Ro-des,» [En línea]. Available: <http://www.ro-des.com/mecanica/el-diesel-o-gasoil>. [Último acceso: 19 Enero 2016].
- [11] G. H. S. Mora, «Slideshare,» [En línea]. Available: [es.slideshare.net/ghsterlingm/diesel-2473621?next\\_slideshow=2](http://es.slideshare.net/ghsterlingm/diesel-2473621?next_slideshow=2). [Último acceso: 19 Enero 2016].
- [12] «Petropar,» Petropar, 08 02 2012. [En línea]. Available: <http://www.petropar.gov.py/index.php/2012-02-08-08-18-09/gasoil>. [Último acceso: 19 Enero 2016].
- [13] G. Rodríguez y M. Ribeiro, *Estudio comparado entre combustible Diesel y Biodiésel*, Argentina: Instituto Nacional de Tecnologías Industriales.

- [14] J. T. A. & P. M. Hilbert, Rendimiento comparativo de biodiésel y gasoil en tractores agrícolas, Buenos Aires: INTA, 2002.
- [15] J. Stratta, Biocombustibles: los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiésel, 2000.
- [16] C. H.D.P., Co-procesamiento catalítico del aceite de fritura y gasoil en una planta piloto de Hidrodessulfuración de gasoil, 2015.
- [17] «Cummins Hub,» [En línea]. Available: <http://cumminshub.com/>. [Último acceso: 2 Febrero 2016].
- [18] J. L. M. & R. J. Agudelo, «Comparación del comportamiento en motor operando con biodiésel proveniente de diversas materias primas.,» *Palmas*, nº 28 (especial), pp. 53-62, 2007.
- [19] G. Ruano, «Emisión de gases en vehiculo experimental diesel-biodiésel,» *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala*, nº 27, 2014.
- [20] «e-auto,» [En línea]. Available: [http://www.e-auto.com.mx/manual\\_detalle.php?manual\\_id=245](http://www.e-auto.com.mx/manual_detalle.php?manual_id=245). [Último acceso: 27 Enero 2016].
- [21] J. E. B. Riba y G. P. R. & R. A. BAquero, «Caracterización de las propiedades físicas de aceites vegetales para ser utilizados como carburante en motores diesel,» *Afinidad*, nº 67, 2010.
- [22] D. Hombría, Determinación del punto de enturbamiento y punto de congelación de muestras de biodiésel. Puesta en marcha y optimización del equipo instrumental necesario..
- [23] A. A. Herrero, Estudio de aditivos para la mejora de las propiedades frías del biodiésel.
- [24] E. Bernard, Biodiésel: Los aspectos mecánicos en los vehiculos, 2010.
- [25] A. Alcantara Carmona, Modelado y optimización del proceso de producción y uso de biodiésel, 2014.
- [26] J. Gustems, «Historia del Nissan Patrol: Y con él llegó la revolución del 4x4,» *Mundo 4x4*, nº 63, 2008.
- [27] Auto10, «30 años de Nissan Patrol: Historias de la mili...,» *Auto10*, 11 Julio 2013.
- [28] ANETO-ETAI, «Nissan Patrol y Patrol GR Motores Diesel 6 cilindros 2.8 (atmosférico y turbo),» *Revista Técnica del Automóvil*, nº 3, pp. 1-90, 1993.
- [29] Nissan Motor Corporation, «CAR-DIRECTORY.NET,» [En línea]. Available: <http://www.cars-directory.net/specs/nissan/>. [Último acceso: 14 Febrero 2016].
- [30] Nissan Motor Corporation, «Partbase,» Manual de Taller Nissan Patrol RD28T, [En línea]. Available: <https://www.partsbase.org>. [Último acceso: 25 Enero 2016].

## **7 ANEXOS**

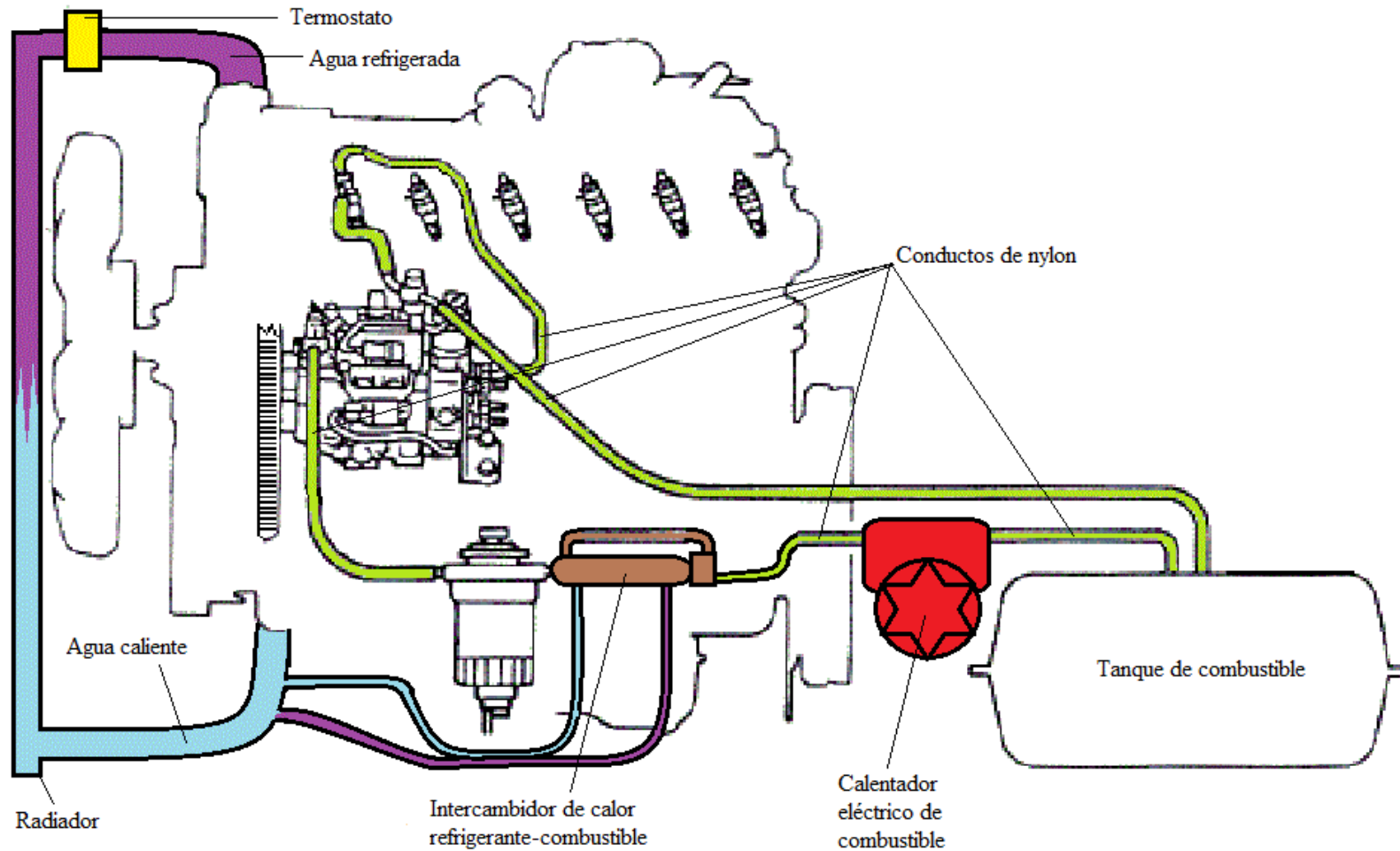
## ANEXO I: ESQUEMAS DE LA INSTALACIÓN

### Esquema de la instalación para climas fríos



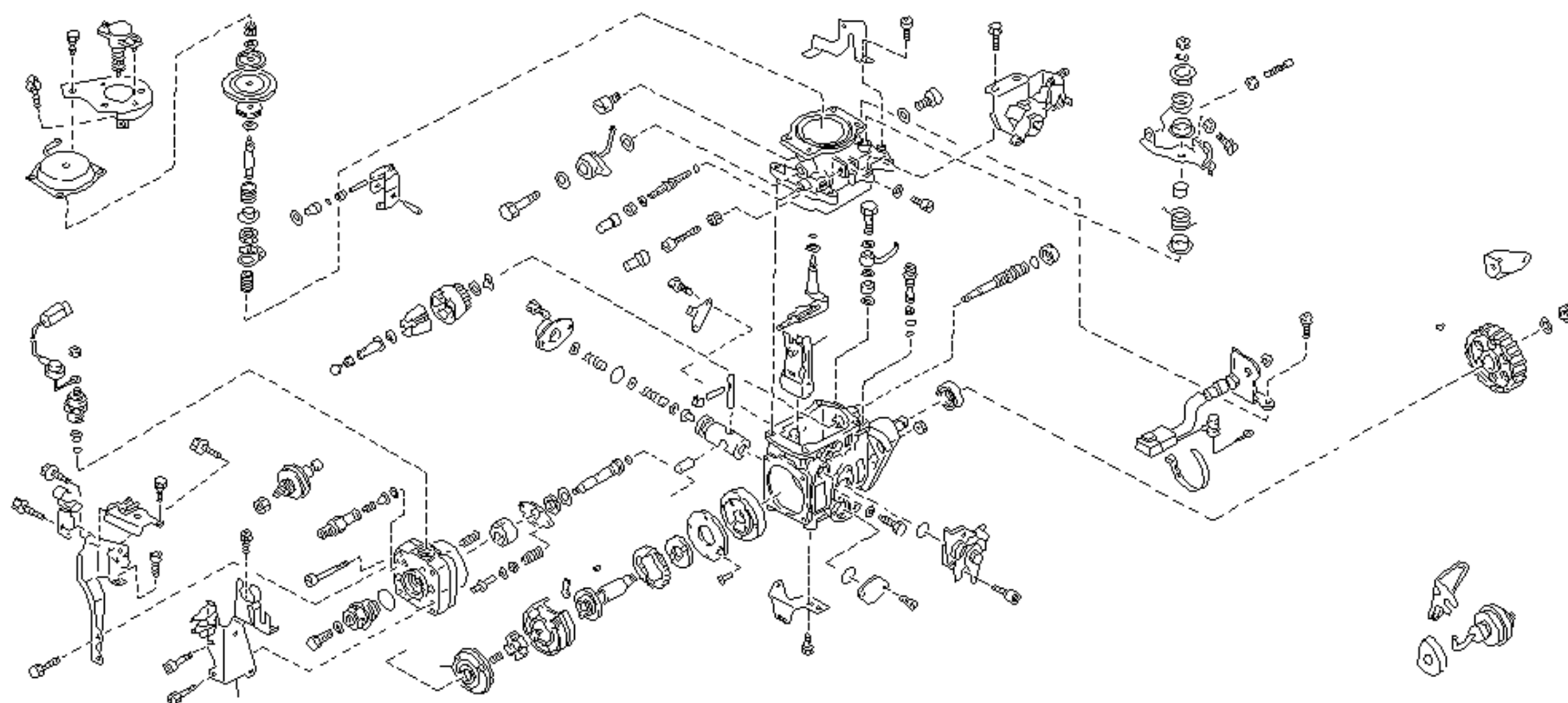
## ANEXO I: ESQUEMAS DE LA INSTALACIÓN

### Esquema de la instalación para climas cálidos



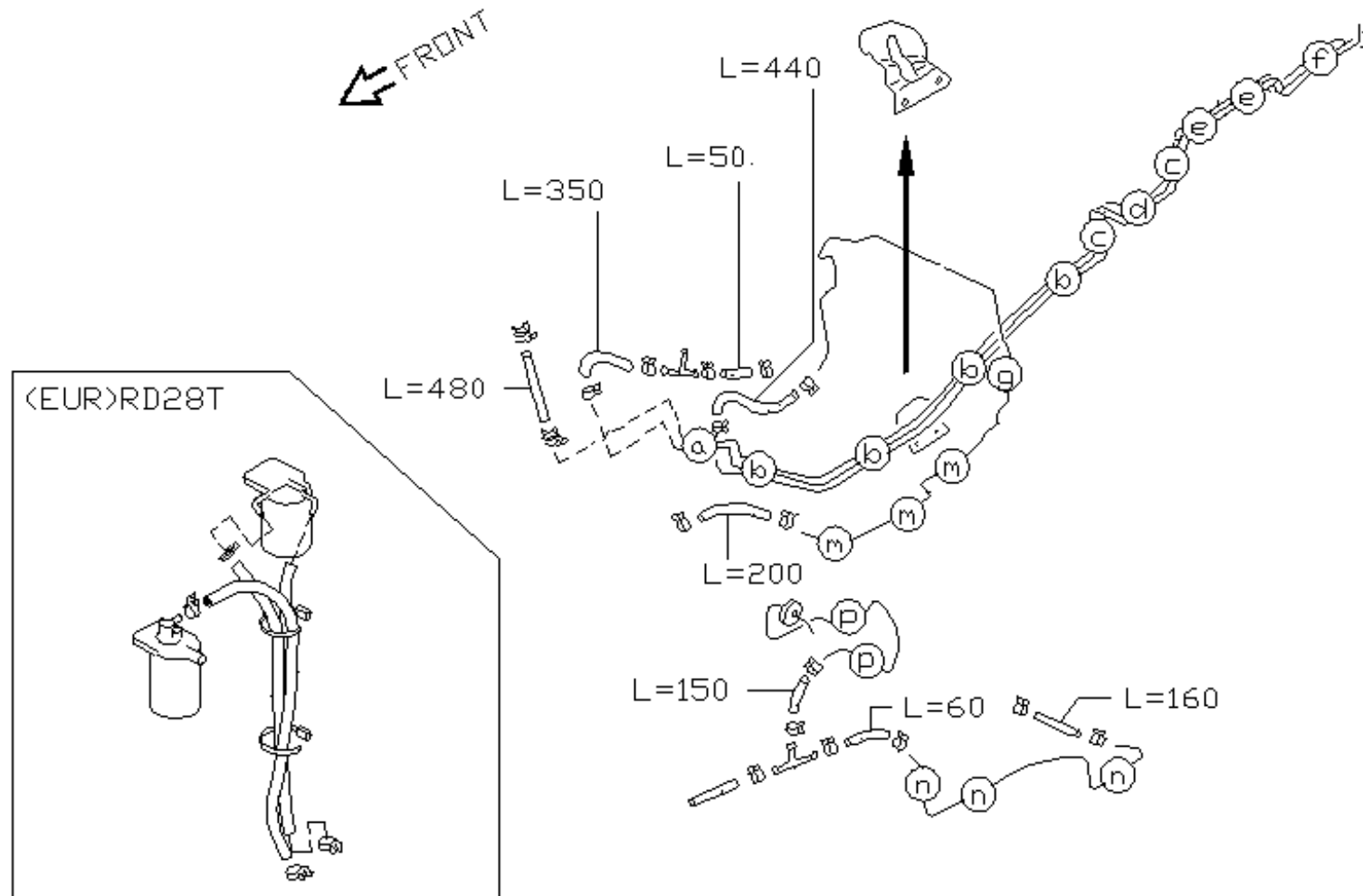
## ANEXO II: ESQUEMAS DETALLADOS DEL NISSAN PATROL RD 28T

### Bomba de inyección



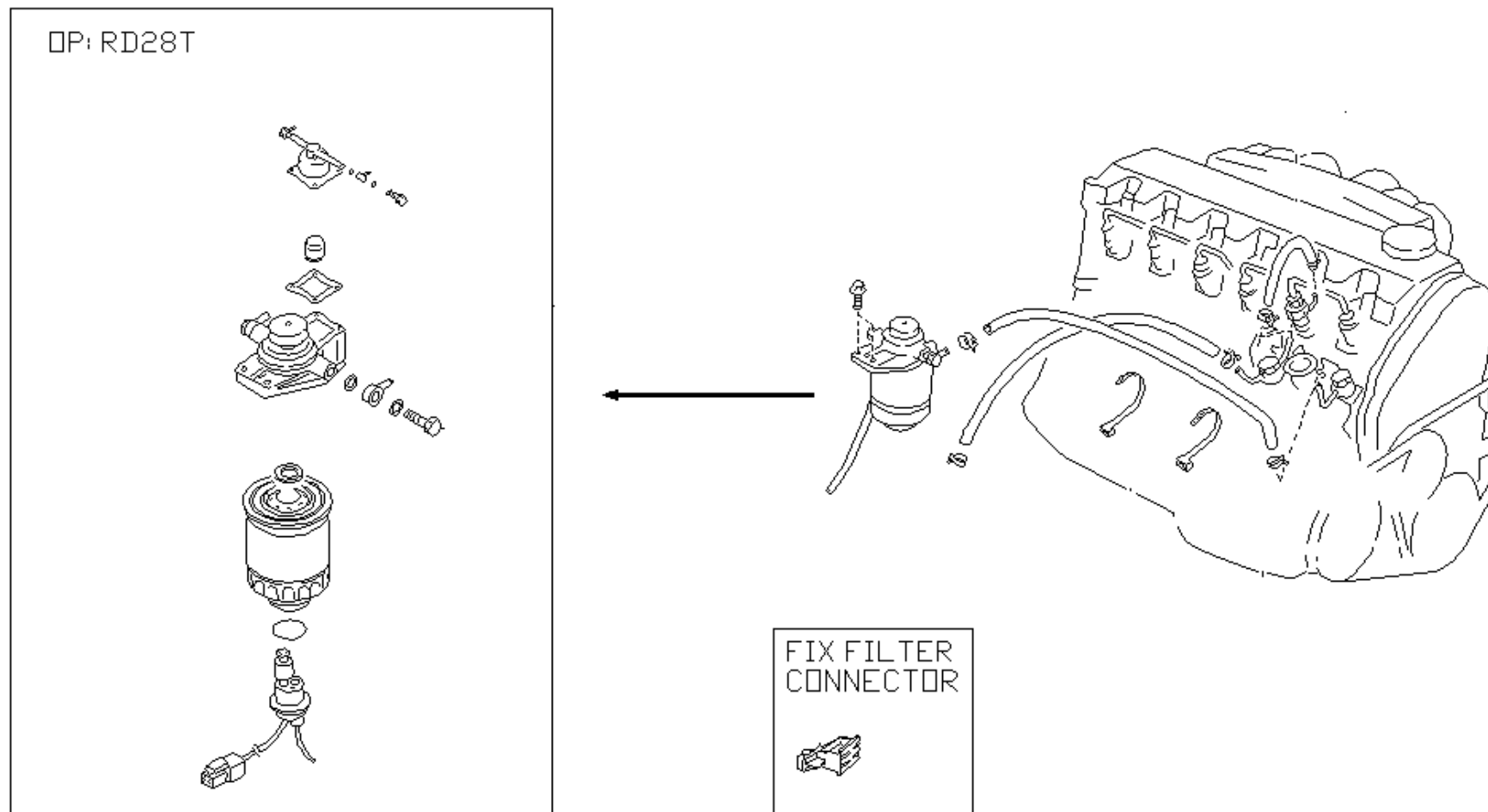
## ANEXO II: ESQUEMAS DETALLADOS DEL NISSAN PATROL RD28T

### Línea de combustible



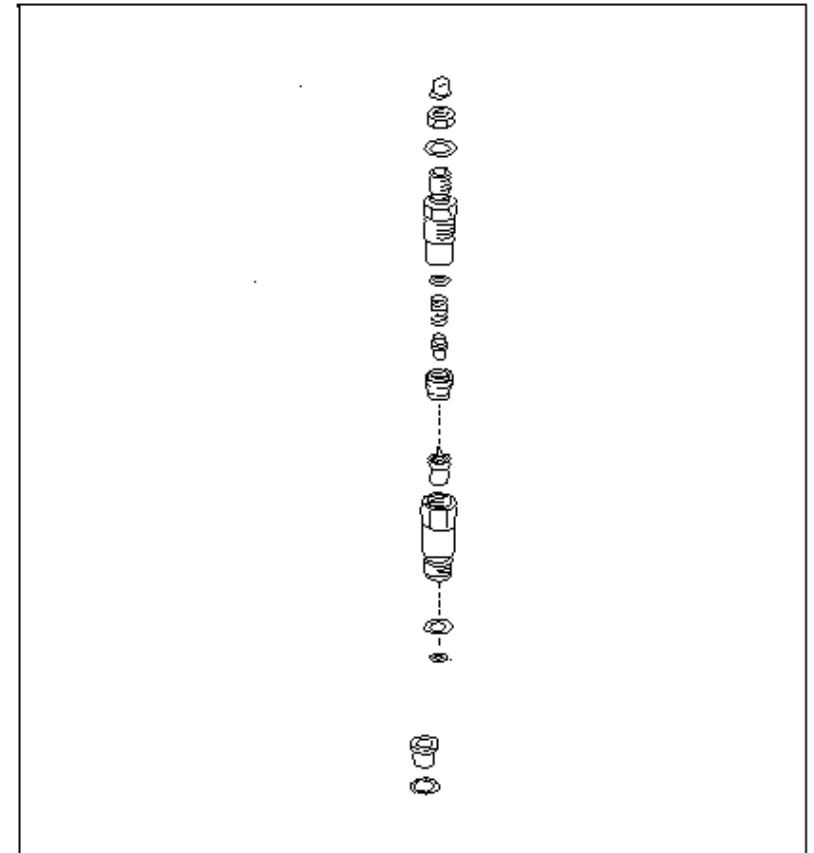
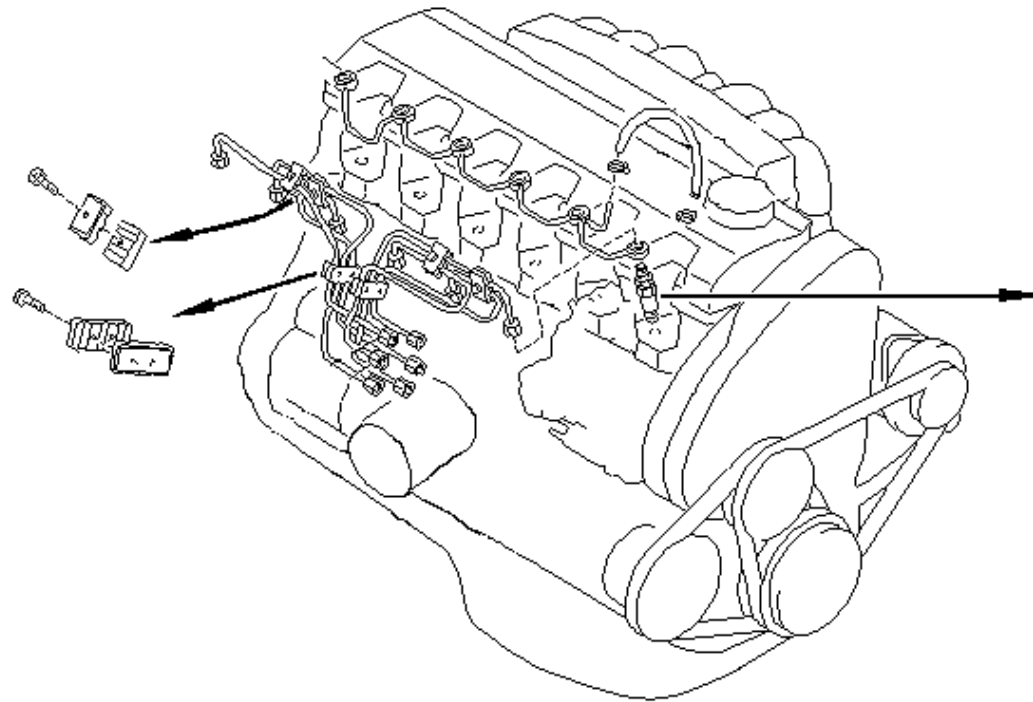
## ANEXO II: ESQUEMAS DETALLADOS DEL NISSAN PATROL RD28T

### Sistema de filtrado de combustible



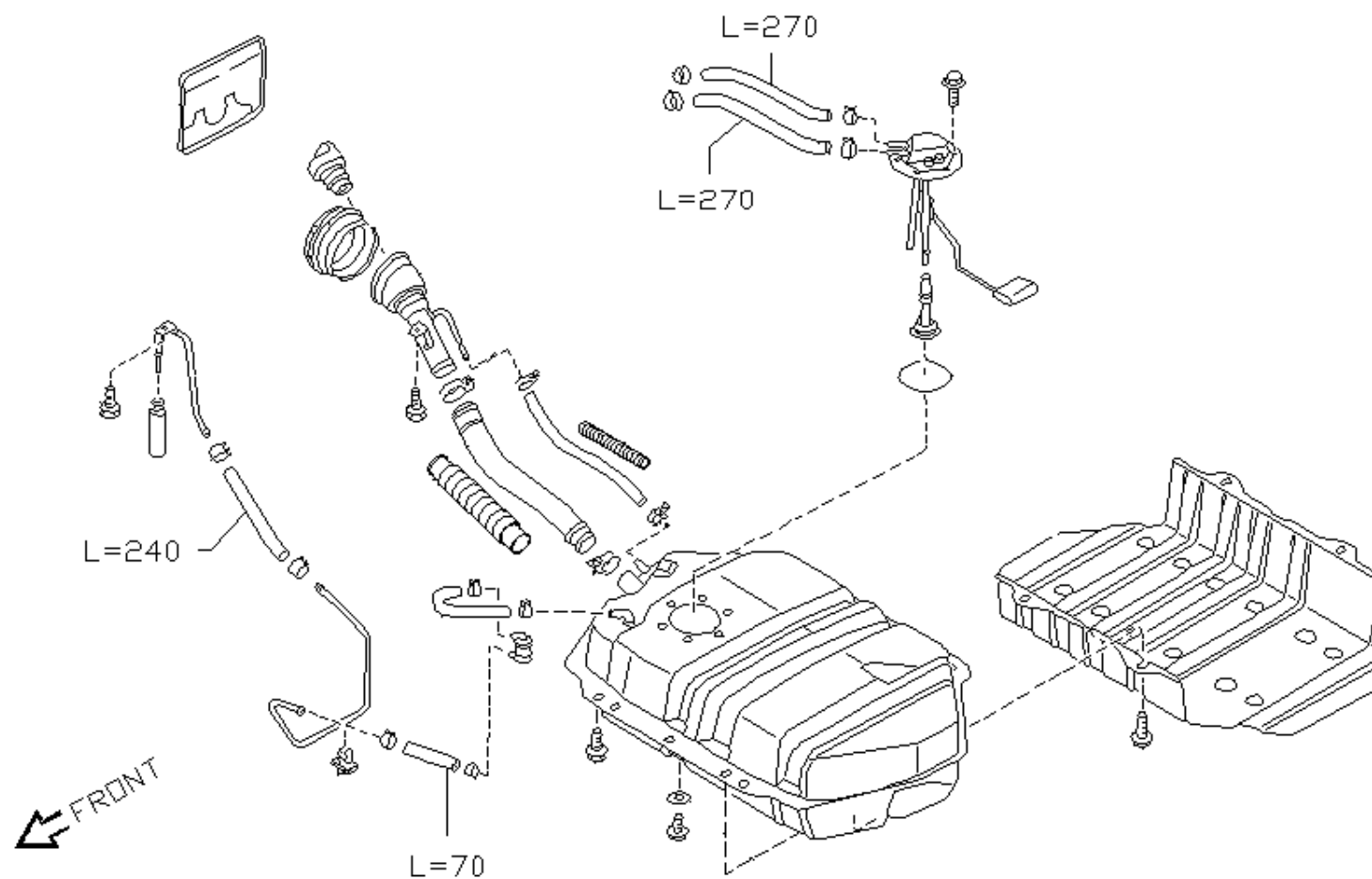
## ANEXO II: ESQUEMAS DETALLADOS DEL NISSAN PATROL RD28T

### Sistema de inyección



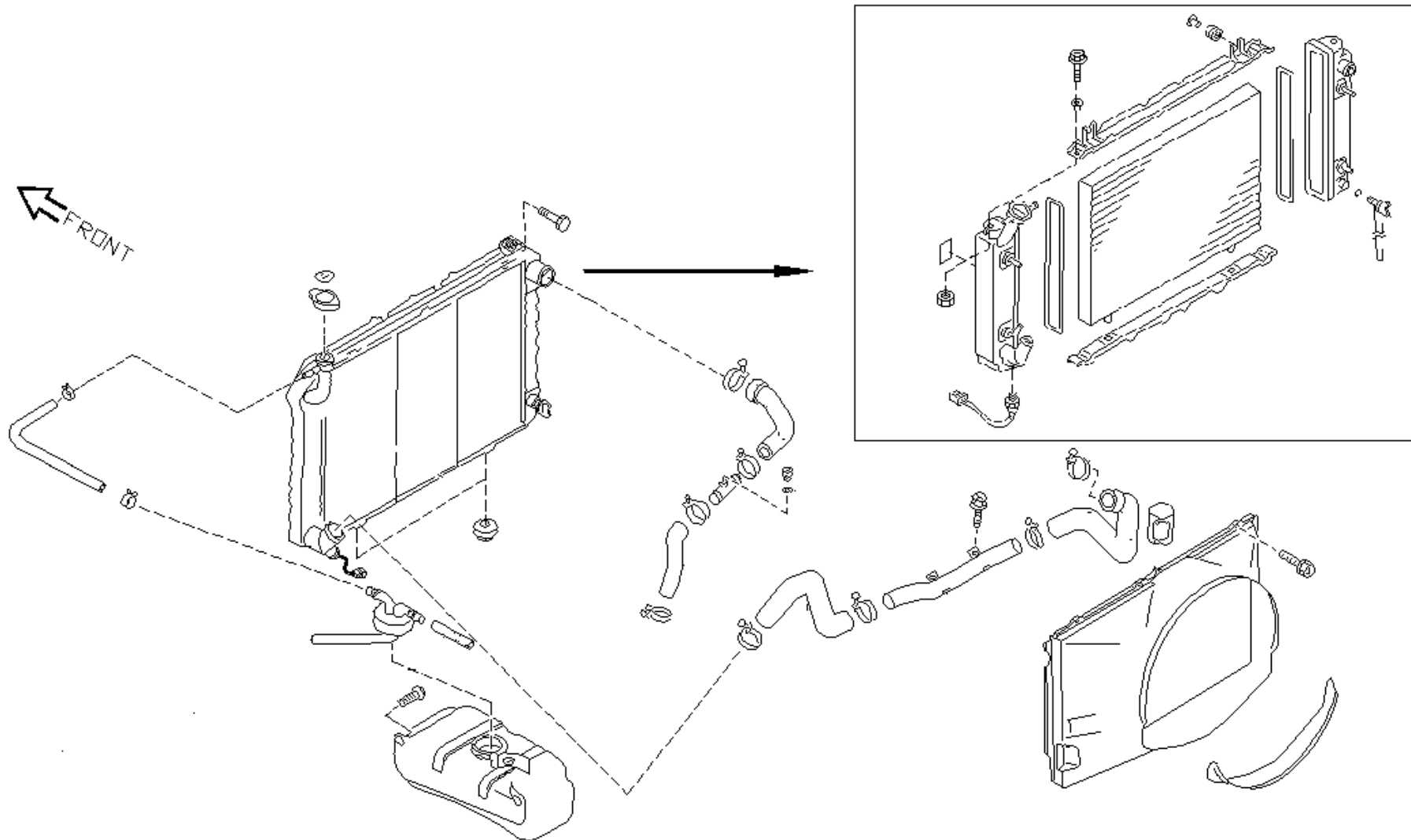
## ANEXO II: ESQUEMAS DETALLADOS DEL NISSAN PATROL RD28T

### Tanque de combustible



## ANEXO II: ESQUEMAS DETALLADOS DEL NISSAN PATROL RD28T

### Circuito de refrigeración



## ANEXO II: ESQUEMAS DETALLADOS DEL NISSAN PATROL RD28T

### Bomba de agua y ventilador del radiador

