



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:



# Agradecimientos

*Quiero dar las gracias a todas las personas que me han apoyado siempre en todo lo que hago y a los que han hecho posible la realización de este trabajo.*

*A mis padres,  
por la paciencia y confianza que han depositado en mí.*

*A mi hermano,  
por haberme enseñado a no rendirme.*

*A mis amigos,  
por su generosidad y comprensión.*

*A la gente que forma parte del CMT,  
especialmente agradecer a Raúl Payri Marín, mi tutor, por darme la oportunidad de desarrollar este Trabajo de Final de Grado en el seno del CMT. También a José Enrique del Rey, técnico de laboratorio, por compartir sus experiencias y conocimientos.*



## Resumen

Se dispone de una bomba neumática de alta presión que es empleada en un sistema de generación de muy alta presión para realizar ensayos de inyección Diesel en Motores de Combustión Interna Alternativos (MCIA). Con estos ensayos se pretende profundizar en los estudios de los motores Diesel y mejorar las prestaciones de los vehículos que emplean estos sistemas. Actualmente, la instalación que es utilizada por el Centro de Motores Térmicos (CMT), solo dispone de esta bomba neumática y de un depósito de alta presión antes de que el Diesel llegue al raíl del sistema de inyección. Por lo tanto, se pretende realizar una instalación experimental para equipar a la bomba neumática con todos los elementos necesarios para controlar el flujo de combustible que entrega a los inyectores. Para ello, se van a introducir nuevos elementos, como un presostato y un vaso expensor, en la zona de baja presión de la bomba neumática y se sustituirá la bomba de baja presión, encargada de alimentar a la bomba neumática, por otra de mejores prestaciones. En la zona de alta presión se introducirá una válvula de control micrométrica y una válvula de seguridad en el depósito de alta presión. Por último, se diseñará un depósito de acero de baja presión que incorpore un intercambiador de calor para reducir los incrementos de temperatura del combustible cuando es devuelto en los conductos de retorno. Y un depósito de alta presión que sea capaz de aguantar la presión máxima que entrega la bomba neumática. Después del montaje, se pondrá en funcionamiento la instalación experimental y se comprobará que funciona correctamente.

## Resum

Es disposa d'una bomba pneumàtica d'alta pressió que és empleada en un sistema de generació de molt alta pressió per a realitzar assajos d'injecció Dièsel en Motors de Combustió Interna Alternatius (MCIA). Amb aquestos assajos es pretén aprofundir en els estudis dels motors Dièsel i millorar les prestacions dels vehicles que empren aquestos sistemes. Actualment, la instal·lació que és utilitzada pel Centre de Motors Tèrmics (CMT), només disposa d'aquesta bomba pneumàtica i d'un depòsit d'alta pressió abans de que el Dièsel arribe al rail del sistema d'injecció. Per tant, es pretén realitzar una instal·lació experimental per a equipar a la bomba pneumàtica amb tots els elements necessaris per a controlar el flux de combustible que es entregat als injectors. Per a això, es van a introduir nous elements, com un presostat i un got expansor, en la zona de baixa pressió encarregada d'alimentar a la bomba pneumàtica per una altra de millors prestacions. En la zona d'alta pressió s'introduirà una vàlvula de control micromètrica i una vàlvula de seguretat en el depòsit d'alta pressió. Finalment, es va a dissenyar un depòsit d'emmagatzematge que incorpore un intercanviador de calor per a reduir els increments de temperatura del combustible quan és tornat en els conductes de retorn. I un depòsit d'alta pressió que puga aguantar la pressió màxima que lliura la bomba pneumàtica. Després del muntatge, es ficarà en funcionament la instal·lació experimental i es comprovarà que funcione correctament.

## **Abstract**

It is available a high pressure pneumatic pump that is used in a very high pressure generation system to perform Diesel injection tests in Reciprocating Internal Combustion Engines (RICE). These tests are intended to deepen the studies of Diesel engines and improve the performance of the vehicles that employ these systems. Currently, the facility which is used by the Heat Engines University Institute, only has this pneumatic pump and a high pressure vessel before Diesel arrives to the rail of the injection system. Therefore, it is intended to develop an experimental facility to equip the pneumatic pump with all the necessary elements to control the flow of fuel delivered to the injectors. To do so, new elements will be introduced, such as a pressure switch and an expansion vessel, in the low pressure zone of the pneumatic pump and the low pressure pump will be replaced, which is responsible of powering the pneumatic pump, for one that provides a better performance. In the high pressure zone it will be introduced a micrometric control valve and a safety valve in the high pressure tank. And a high-pressure tank capable of withstanding the maximum pressure delivered by the pneumatic pump. Finally, it will be designed a steel tank that incorporates a heat exchanger to reduce the fuel temperature increases when it is returned to the return lines. After assembly, the experimental facility will be run and tested for proper operation.



## ÍNDICE DE DOCUMENTOS

Documento I: Memoria.....	1
Documento II: Pliego de Condiciones.....	76
Documento III: Presupuesto.....	82
Documento IV: Planos.....	90

## ÍNDICE GENERAL

### DOCUMENTO I: MEMORIA

<b>1. BASES DEL TRABAJO</b> .....	4
1.1 Introducción al problema.....	4
1.2 Emplazamiento.....	5
1.3 Antecedentes.....	6
1.4 Objetivo.....	7
1.5 Estructura del trabajo.....	8
<b>2. RANGO DE SOLUCIONES Y ÁMBITO DE APLICACIÓN</b> .....	9
2.1 Introducción.....	9
2.2 Posibles soluciones.....	10
2.3 Vista previa simplificada de la instalación.....	12
2.4 Importancia de la presión en el sistema de inyección.....	14
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	23
3.1 Introducción.....	23
3.2 Clasificación y principio de funcionamiento.....	23
<b>4. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL</b> .....	36
4.1 Introducción.....	36
4.2 Elementos de la zona de baja presión.....	38
4.3 Bomba neumática de alta presión.....	53
4.4 Componentes del circuito neumático de aire.....	56
4.5 Elementos de la zona de alta presión.....	58
4.6 Otros elementos.....	64
<b>5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES</b> .....	65
5.1 Resultados.....	65
5.2 Conclusiones.....	70

6. PROYECTOS FUTUROS .....	71
----------------------------	----

<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>72</b>
---------------------------	-----------

## **DOCUMENTO II: PLIEGO DE CONDICIONES**

1. CONDICIONES GENERALES .....	78
1.1 Introducción .....	78
1.2 Condiciones generales del laboratorio .....	78
1.3 Condiciones generales de la instalación y equipos .....	79
1.4 Reglamentos y normas a cumplir durante su puesta en marcha .....	79
2. CONDICIONES TÉCNICAS .....	80
2.1 Introducción .....	80
2.2 Secuencia de arranque y paro de la instalación .....	80
2.3 Mantenimiento de la instalación .....	81

## **DOCUMENTO III: PRESUPUESTO**

1. PRESUPUESTO GENERAL .....	84
1.1 Introducción .....	84
1.2 Cálculo de los costes .....	84
1.3 Método de cálculo .....	88

## **DOCUMENTO IV: PLANOS**

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1: Foto del edificio principal del Centro de Motores Térmicos de la UPV. ....	5
Figura 1. 2: Instalación de Alta Presión y Alta Temperatura del CMT. [3] .....	7
Figura 2. 1: Funcionamiento de un acumulador hidráulico tipo vejiga. [6] .....	11
Figura 2. 2: Diagrama de funcionamiento de un presostato de pistón. [7] .....	12
Figura 2. 3: Diseño simplificado de la instalación a diseñar. ....	13
Figura 2. 4: Circuito neumático de la instalación de alimentación de combustible a diseñar. ....	13
Figura 2. 5: Principales fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento. [8] .....	15
Figura 2. 6: Características del proceso de combustión de un MEC. [10] .....	18
Figura 2. 7: Interacción entre la geometría del bowl y la geometría del inyector. [10] .....	18
Figura 2. 8: Gráficas de antes y después de aplicar la técnica downspeeding a un motor. [11] .....	20
Figura 2. 9: Composición de los gases de escape en un motor MEC. [13] .....	21
Figura 2. 10: Soluciones activas para reducir las emisiones contaminantes. [14] .....	22
Figura 3. 1: Diagrama de un motor MEP de 4 tiempos. [16] .....	24
Figura 3. 2: Sistemas de inyección. [18] .....	25
Figura 3. 3: Diagrama del sistema Common-Rail. [19] .....	26
Figura 3. 4: a) electrobomba de combustible. b) esquema de la bomba celular de rodillos [20] .....	27
Figura 3. 5: Bomba rotativa de engranajes externos [22] .....	28
Figura 3. 6: Funcionamiento de un filtro Diesel. [23] .....	28
Figura 3. 7: Esquema de una bomba de alta presión de 3 émbolos. [24] .....	29
Figura 3. 8: a) Raíl. b) Esquema del sensor de alta presión del raíl. [25] .....	31
Figura 3. 9: Inyector de un sistema Common-Rail con válvula de tipo solenoide. [26] .....	32
Figura 3. 10: Sistema de inyección electrónica con inyector-bomba. [27] .....	34
Figura 3. 11: Fases del proceso de combustión de un MEC. [28] .....	35
Figura 4. 1: Diseño de la maqueta que se va a construir (vista frontal) .....	36
Figura 4. 2: Diseño de la maqueta experimental que se va a construir (vista lateral) .....	37
Figura 4. 3: Depósito de combustible original de la maqueta. ....	38
Figura 4. 4: Esquema del nuevo depósito de combustible. ....	40

Figura 4. 5: Imagen del depósito de acero construido.....	44
Figura 4. 6: Parte inferior del depósito de BP. ....	45
Figura 4. 7: a) Imagen de la bomba de BP de la marca FLOJET. b) Curva de flujo para 150 psi. [30] ...	47
Figura 4. 8: imagen del filtro Diesel KL 182. ....	48
Figura 4. 9: Presostato modelo DSSG-2 de la marca INPRO. [32] .....	49
Figura 4. 11: Funcionamiento eléctrico.....	50
Figura 4. 10: Funcionamiento mecánico. ....	50
Figura 4. 13: Mecanismo interno del presostato. ....	51
Figura 4. 12: Presostato Baumer tipo RP2N. ....	51
Figura 4. 14: Modelo de funcionamiento del nuevo presostato.....	51
Figura 4. 15: Vaso de expansión para hidrocarburos. [33] .....	52
Figura 4. 16: Manómetro. [34] .....	53
Figura 4. 17: Foto de la bomba neumática de alta presión.....	54
Figura 4. 18: Modelo de los componentes del pistón de la bomba neumática de AP.....	55
Figura 4. 19: a) Curva de funcionamiento de la válvula manorreguladora AIGNEP. [38] b) Válvula AIGNEP. ....	56
Figura 4. 20: a) Curva de funcionamiento de la válvula electrorreguladora Lucifer. b) Válvula Lucifer. [38] .....	57
Figura 4. 21: Modelo de funcionamiento del regulador de presión. [39].....	58
Figura 4. 22: Foto tomada al acumulador hidráulico de alta presión. ....	59
Figura 4. 23: Esquema interno del acumulador hidráulico de alta presión. [35].....	59
Figura 4. 24: Gráficas del comportamiento de la presión en el interior del raíl. [36].....	60
Figura 4. 25: Válvula de control micrométrica (MicroMetering). [37].....	61
Figura 4. 26: MicroMetering equipada con dos ventiladores .....	61
Figura 4. 27: Válvula de seguridad del depósito de AP .....	61
Figura 4. 28: Información técnica de los tubos de alta presión de Parker Autoclave Engineers. [39]..	63
Figura 4. 29: Foto del aíl conectado a la IAPAT. ....	63
Figura 4. 30: Circuito eléctrico de la instalación. ....	64
Figura 5. 1:Montaje de la instalación experimental.....	65
Figura 5. 2: Foto de la electrobomba. ....	66
Figura 5. 3: Foto del presostato y del vaso expansor.....	67

Figura 5. 4: Conexiones eléctricas del presostato con la electrobomba.....	67
Figura 5. 5: Manómetro y termopar de la instalación experimental.....	68
Figura 5. 6: Montaje de la zona de baja presión de la instalación experimental.....	68
Figura 5. 7: Montaje del depósito de AP.....	69
Tabla 1. 1: Cálculo del coste de la mano de obra empleada.....	84
Tabla 1. 2: Cálculo del coste de los equipos empleados.....	85
Tabla 1. 3: Cálculo del coste del material adquirido.....	86
Tabla 1. 4: Cálculo del coste de la estructura de aluminio.....	86
Tabla 1. 5: Cálculo del coste del depósito de baja presión.....	86
Tabla 1. 6: Cálculo del coste del material fungible.....	87
Tabla 1. 7: Resumen del coste total del proyecto.....	87



**Documento I**

**Memoria**

## ÍNDICE DEL DOCUMENTO

<b>1. BASES DEL TRABAJO</b> .....	4
1.1 Introducción al problema .....	4
1.2 Emplazamiento .....	5
1.3 Antecedentes.....	6
1.4 Objetivo .....	7
1.5 Estructura del trabajo.....	8
<b>2. RANGO DE SOLUCIONES Y ÁMBITO DE APLICACIÓN</b> .....	9
2.1 Introducción .....	9
2.2 Posibles soluciones.....	10
2.2.1 Aumentar el caudal proporcionado por el raíl .....	10
2.2.2 Modificar el funcionamiento de la bomba de baja presión .....	10
2.3 Vista previa simplificada de la instalación.....	12
2.4 Importancia de la presión en el sistema de inyección .....	14
2.4.1 Influencia sobre la potencia .....	14
2.4.2 Influencia sobre el consumo.....	17
2.4.2.1 Mejora de la termodinámica .....	17
2.4.2.2 Reducción de las pérdidas mecánicas .....	19
2.4.2.3 Recuperación de la energía de escape .....	21
2.4.3 Influencia sobre las emisiones contaminantes.....	21
2.4.4 Conclusiones .....	22
<b>3. MARCO TEÓRICO</b> .....	23
3.1 Introducción .....	23
3.2 Clasificación y principio de funcionamiento.....	23
3.2.1 Motores de encendido provocado (MEP) .....	24
3.2.2 Motores de encendido por compresión (MEC) .....	24
3.3.2.1 Inyección del combustible y formación de la mezcla .....	25
3.3.2.1 Proceso de combustión .....	35
<b>4. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL</b> .....	36
4.1 Introducción .....	36
4.2 Elementos de la zona de baja presión.....	38

4.2.1	Depósito de combustible de baja presión .....	38
4.2.1.1	Diseño del nuevo depósito .....	39
4.2.2	Bomba de baja presión .....	46
4.2.3	Filtro de combustible Diesel .....	48
4.2.4	Presostato.....	48
4.2.5	Acumulador hidráulico de baja presión.....	52
4.2.6	Manómetro.....	53
4.3	Bomba neumática de alta presión.....	53
4.4	Componentes del circuito neumático de aire .....	56
4.5	Elementos de la zona de alta presión.....	58
4.5.1	Depósito de combustible de alta presión.....	58
4.5.2	Nuevo depósito de combustible de baja presión .....	62
4.6	Otros elementos.....	64
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>65</b>
5.1	Resultados .....	65
5.2	Conclusiones.....	70
<b>6.</b>	<b>PROYECTOS FUTUROS .....</b>	<b>71</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>72</b>



## Capítulo 1

### BASES DEL TRABAJO

#### 1.1 Introducción al problema

Este proyecto está enfocado en el estudio de los sistemas de inyección de combustible Diesel en distintos motores, desde vehículos ligeros hasta barcos o camiones, y en motores industriales para maquinarias pesadas. En concreto, consiste en el diseño de un sistema de alimentación de gasoil para una bomba neumática, empleada en una instalación de generación de muy alta presión.

Por lo tanto, se diseñará y se pondrá en marcha una instalación completa para alimentar la bomba neumática, que se empleará para entregar combustible a muy alta presión a un sistema *Common-Rail*, que es empleado por el Centro de Motores Térmicos (CMT) para realizar ensayos de inyección con distintos inyectores del mercado actual.

El desarrollo de este proyecto es de interés en el mundo de la automoción, especialmente en el campo que se centra en el estudio y mejora de los Motores de Combustión Interna Alternativa (MCIA), ya que tienen una gran importancia en el mercado debido a sus altas prestaciones. Hoy en día, la turbina de gas o motores eléctricos están sustituyendo a los MCIA en este campo, aunque en pequeñas series, puesto que disponen de una autonomía limitada y sus prestaciones son notablemente inferiores. Además, se busca constantemente la mejora de estas prestaciones -mayor potencia, menor consumo y menores emisiones contaminantes-, mediante técnicas como la sobrealimentación del motor o modificación de las propiedades de los combustibles, aunque, actualmente, las dos estrategias más importantes son la reducción del tamaño del motor (*downsizing*) y de la velocidad de giro (*downspeeding*), donde el sistema de inyección juega un papel muy importante, ya que se optimiza lo máximo posible el proceso de combustión.

Por otro lado, dentro de los motores que emplean combustibles fósiles, los motores Diesel ocupan más de la mitad del mercado y cada año superan en mayor cantidad a los motores de gasolina. Este hecho supone un mayor afán en I+D y cada vez son más las empresas del sector las que optan por aumentar sus investigaciones en el desarrollo de los sistemas Diesel, como es el caso de los sistemas de inyección.

El sistema *Common-Rail* es el sistema de inyección más empleado actualmente. Se desarrolló completamente en 1978 por el Doctor Marco Ganser, aunque su primer prototipo fue presentado por Robert Huber en 1960. No fue hasta 1995, gracias a Shohei Itoh y Masahiko Miyaki, cuando se usó en el primer vehículo (en el camión Hino Ranger). [1]

Numerosas empresas del sector automovilístico, tanto nacionales como internacionales, confían en las instalaciones del CMT para realizar los ensayos de sus nuevos proyectos futuros. En este caso, el trabajo está enfocado en el departamento de inyección y se pretende mejorar la Instalación de Alta Presión y Alta Temperatura (IAPAT) donde realizan los ensayos de inyección y combustión de combustible.

Actualmente, los inyectores ensayados en la IAPAT son alimentados con una bomba neumática de 4000 bar. Este trabajo va a consistir en mejorar, tanto la parte de baja presión de esta bomba, que es la zona de la instalación encargada de suministrar el caudal de combustible necesario a la bomba neumática, como la parte de alta presión que es la encargada de suministrar combustible al conjunto de los inyectores.

Para entender mejor la importancia del sistema de inyección sobre las prestaciones del motor, se explicará los fundamentos teóricos básicos de un motor y el funcionamiento de los sistemas de inyección que compiten actualmente en el mercado. Después, se analizará el diseño de la maqueta de alimentación de combustible para una mejor comprensión y se detallarán cada uno de los elementos que la componen. Finalmente, se presentará el montaje final de la instalación experimental y se extraerán resultados y conclusiones.

## 1.2 Emplazamiento

Este trabajo tiene lugar en el Edificio 6D de la Universidad Politécnica de Valencia donde se encuentra el Centro de Motores Térmicos (CMT). Este centro está formado por el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos (DMMT) y el Instituto Universitario de Motores Térmicos.

El CMT es un centro de investigación y educación que participa plenamente en el desarrollo del futuro del motor de combustión desde 1979. Se realizan investigaciones para comprender mejor los procesos físicos relevantes involucrados, y se llevan a cabo estudios para optimizar el comportamiento del motor y ayudar en su desarrollo. Se combinan pruebas experimentales y estudios teóricos que aportan resultados técnicos y científicos relevantes. [2]

Compañías como *Aprilia*, *BMW*, *General Motors*, *Nissan* o *Renfe*, entre muchas otras, confían en el CMT para realizar sus investigaciones y proyectos futuros.

Está compuesto por varios campos de estudio, que son: gestión del aire, control del ruido, mantenimiento, renovación de la carga e inyección-combustión. Este proyecto pertenece al último campo, especialmente al departamento de inyección.



Figura 1. 1: Foto del edificio principal del Centro de Motores Térmicos de la UPV.

### 1.3 Antecedentes

Entre las numerosas instalaciones del CMT, la línea de inyección fue creada en 1993 para realizar ensayos relacionados especialmente con los sistemas de inyección de los nuevos motores Diesel y poder realizar estudios para mejorar el proceso de mezcla y combustión de este combustible.

En el año 2008, con el objetivo de ampliar el conocimiento del proceso de inyección, mezcla y atomización de combustible en el interior del cilindro de los motores Diesel, se instaló una maqueta de inyección que simulaba las condiciones de operación que tenían lugar dentro de los cilindros del motor Diesel justo en el momento en el que se producía la inyección del combustible. Esta instalación recibe el nombre de *IAPAT* (Instalación de Alta Presión y Alta Temperatura).

Actualmente, el CMT dispone de dos de estas maquetas de inyección, ya que hace un par de años se reprodujo la maqueta original, a la cual se le habían introducido importantes mejoras. En la Figura 1.2, se muestra una foto tomada a la nueva maqueta de inyección. Consiste en una especie de cámara, donde se puede conectar un inyector en una de sus caras y dispone de varias ventanas para poder visualizar los fenómenos que ocurren en su interior. A través de numerosos dispositivos se pueden llevar a cabo estudios como: el comportamiento del chorro Diesel a la salida de la tobera del inyector o las diferencias existentes entre las distintas técnicas actuales de inyección.

Los inyectores que se ensayan en la maqueta deben tener un sistema de alimentación de combustible que simule las mismas condiciones que las del vehículo, o maquinaria, en el cual se va a implementar. Para ello, se dispone de una bomba neumática de pistones de alta presión (7000 bar) que se encarga de alimentar Diesel a un *Common-Rail* a una presión que puede estar por encima de los 2800 bar (presión superior a la actual de mercado).

El compañero Francisco Salvador Alamar, a fin de concluir sus estudios de grado, estudió durante el año 2016 el comportamiento de esta bomba neumática, la cual modificó para que entregara como máximo 4000 bar. Esta considerable reducción de presión se llevó a cabo debido a que la instalación estaba diseñada para soportar presiones máximas de 2800 bar, siendo, por tanto, desaprovechada gran parte de la capacidad de la bomba. La empresa *Nova Swiss Sarl* modificó la relación de áreas, de este modo la bomba modificada entregaba un máximo de 4000 bar y 4 centímetros cúbicos de caudal (el doble del que poseía antes). Además, incluyó una electroválvula reguladora de presión para mejorar su precisión, robustez y seguridad (válvula *Parker*).

Esta bomba neumática de alta presión consta de una parte neumática y otra hidráulica. Por la parte hidráulica circula Diesel, que es impulsado mediante una bomba de baja presión desde un depósito. Esta bomba de baja presión se trata de una bomba volumétrica rotatoria de engranajes dentados que fue adquirida de la empresa *Pierburg*. Trabaja a 4 bar y está sumergida en el depósito de combustible a fin de que entregue más caudal. Además, funciona de forma continua y a su máxima potencia, provocando que el Diesel del depósito aumente de temperatura. Por lo que, el enfoque de este trabajo va a consistir en equipar a esta bomba neumática de alta presión (AP), de todos los elementos necesarios para que entregue el caudal de Diesel bajo unas condiciones de funcionamiento precisas y adecuadas, y mejorar de este modo la instalación completa de la maqueta de inyección.

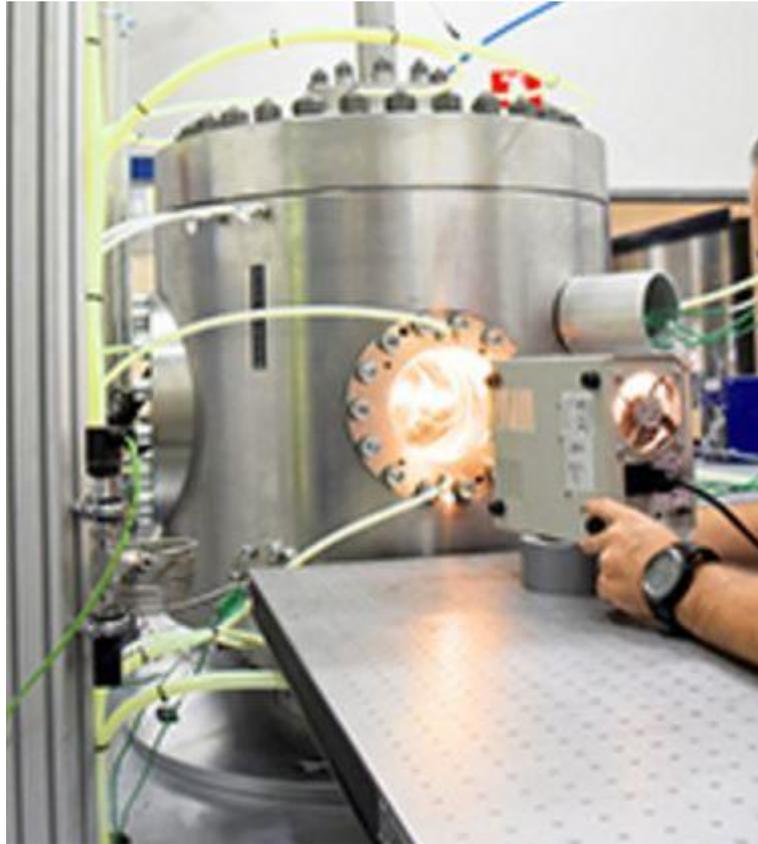


Figura 1. 2: Instalación de Alta Presión y Alta Temperatura del CMT. [3]

## 1.4 Objetivo

Este proyecto se lleva a cabo con la finalidad de conseguir varios objetivos.

El primero de ellos es meramente académico, pues con este Trabajo de Final de Grado se pretende finalizar los estudios en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) en la titulación de Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales (GITI) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) y acceder posteriormente al Máster en Ingeniería Industrial.

En segundo lugar, con este trabajo se pretende diseñar un sistema de alimentación de combustible para una bomba neumática de muy alta presión, a fin de mejorar una de las instalaciones de la línea de inyección del CMT. Se reemplazará la bomba de baja presión (BP) encargada de suministrar combustible a la bomba neumática por una de mayor eficiencia y se añadirán elementos encargados del control del flujo, como son un presostato y un acumulador hidráulico. Esto evitará que la bomba de BP esté en continuo funcionamiento y la entrega de combustible se realice a una presión controlada. Además, se sustituirá la garrafa de combustible, que es empleada como depósito de BP, y se diseñará uno de aproximadamente 20 litros de capacidad con un intercambiador de calor en su interior, por el que circulará agua a baja temperatura para reducir los incrementos de temperatura del Diesel. Por último, se diseñará un depósito de AP para aumentar la capacidad del raíl del sistema *Common-Rail*.

Con estos cambios en la instalación, el sistema será más estable y robusto, y no será necesaria una tarea de mantenimiento excesivamente periódica.

Por lo tanto, al mejorar el sistema de alimentación se mejorará el sistema de inyección, obteniéndose unos ensayos más precisos, ya que se puede conseguir una reducción en el tiempo de combustión y una mejor mezcla en un tiempo inferior, lográndose así mejorar los objetivos principales del mundo de la automoción, que son, como ya hemos dicho, aumento de la potencia, reducción del consumo y de las emisiones contaminantes.

Al concluir el trabajo se verificará si se ha conseguido mejorar el sistema de inyección que es alimentado con esta bomba neumática.

## 1.5 Estructura del trabajo

Este trabajo está formado por cuatro documentos: memoria, pliego de condiciones, presupuesto y planos.

La memoria es el documento principal de este proyecto. Es el más amplio y está dividido en seis capítulos, que se describen a continuación.

- **Capítulo 1. Bases del trabajo.** Breve introducción al problema y antecedentes de este trabajo. Asimismo, se plantean los objetivos que se desean alcanzar con este proyecto.
- **Capítulo 2. Rango de soluciones y ámbito de aplicación.** Se plantean distintas alternativas para solucionar el problema de partida y se detalla el contexto tecnológico al que está enfocado este trabajo.
- **Capítulo 3. Marco teórico.** Breve introducción teórica sobre los MCIAs y los sistemas de inyección, haciendo especial hincapié en el sistema *Common-Rail*.
- **Capítulo 4. Instalación experimental.** Se presenta el diseño de la nueva instalación y se detallan todos los elementos que la componen.
- **Capítulo 5. Resultado y conclusiones.** Se muestra el montaje de la instalación completa, se explica el sentido del flujo del combustible Diesel a través de todos los elementos y se comprueba que la instalación funciona correctamente.
- **Capítulo 6. Proyectos futuros.** La maqueta para la generación de alta presión que se ha mejorado ofrece la posibilidad de aumentar su capacidad, así como de mejorar algunos de sus elementos, por lo que pueden llevarse a cabo nuevos trabajos.

El documento de pliego de condiciones está compuesto por dos capítulos. El primero de ellos hace referencia a las condiciones generales que deben cumplirse en laboratorio y durante el uso de la instalación y equipos. En el segundo, se explican las condiciones técnicas para la utilización y el mantenimiento de la instalación experimental.

En el documento presupuesto se recogen los costes que ha supuesto la realización de este proyecto.

Finalmente, se presentan en el último documento los planos de las distintas piezas y elementos diseñados.

## Capítulo 2

# RANGO DE SOLUCIONES Y ÁMBITO DE APLICACIÓN

### 2.1 Introducción

Los motores térmicos empleados en la automoción han ido evolucionando motivados por los avances tecnológicos que van surgiendo cada año. Los avances característicos, tanto en los motores de encendido por compresión (MEC) como en los de encendido provocado (MEP), se basan en la modificación de la arquitectura del motor, uso de materiales nuevos, introducción de un sistema electrónico de control o la sobrealimentación. Otros avances más específicos son, por ejemplo, cambio de propiedades de los combustibles, mejoras en la formación de la mezcla y sistemas anticontaminación cada vez más restrictivos.

Una parte fundamental para que el motor entre en funcionamiento es el sistema de alimentación de combustible, que es el encargado de transportar el combustible que se encuentra en el depósito hasta los cilindros. En este aspecto, los sistemas de alimentación de los vehículos también han avanzado enormemente.

Los automóviles de gasolina antiguos empleaban los carburadores como sistema de alimentación. Este elemento era el encargado de realizar la mezcla aire-combustible bajo unas condiciones idóneas para que se produjese la combustión. A partir del año 1990, el carburador dejó de emplearse y fue sustituido por otros sistemas más innovadores, los sistemas de inyección. [4]

En los sistemas de inyección de gasolina, usados en los MEP, se utiliza una válvula de mariposa con un regulador que sustituye la función del carburador. Dependiendo de la posición de esta válvula se puede controlar la cantidad de aire que se introduce en el colector de admisión. Una vez introducida la cantidad de aire necesaria, mediante un inyector (o varios) colocado en el colector se inyecta la gasolina y se produce la mezcla. Posteriormente, esta mezcla aire-gasolina se introduce en el cilindro.

Por otro lado, los automóviles de gasoil, los MEC, siempre han usado los sistemas de inyección Diesel para realizar el proceso de formación de la mezcla. Como se explicará en los fundamentos teóricos, el proceso de combustión en los MEC es más lento que en los MEP, y además no depende del régimen de giro del motor. Para conseguir acortar la distancia de tiempos entre ambos procesos de combustión se recurre a sistemas de inyección mucho más sofisticados en este tipo de motores.

Por la tanto, puesto que el papel del sistema de inyección es más importante en los motores Diesel que en los de gasolina, este trabajo se centrará en estos motores, que además son los mismos con los que el CMT realiza sus ensayos de inyección y combustión.

Para mejorar la instalación del sistema de inyección se pensó en realizar varias modificaciones, que se presentan a continuación.

## 2.2 Posibles soluciones

### 2.2.1 Aumentar el caudal proporcionado al raíl

Una de las alternativas consistía en aumentar el caudal entregado al raíl colocando en paralelo con la bomba de AP existente, otra de las mismas características. Al realizarse la instalación en paralelo, la presión proporcionada por las bombas sigue siendo de 4000 bar, pero el caudal se duplica. Al aumentar el caudal de combustible (y de la cantidad de aire) se consigue introducir la mezcla en menos tiempo, mejorando el proceso de combustión en los MEC.

El CMT disponía de una segunda bomba neumática de AP del mismo modelo a la empleada en la maqueta, así que no sería necesario gastar parte del presupuesto en adquirir una nueva. Sin embargo, solo se disponía de una electroválvula. Se trata de la válvula *Lucifer EPP4 Comfort* fabricada por la empresa Parker Hannifin. Estudiando las curvas proporcionadas por el fabricante se llegó a la conclusión de que la válvula no sería capaz de abastecer simultáneamente a las dos bombas, por lo que sería necesario comprar una segunda válvula Parker para que trabajara junto a esta, o bien comprar otra más potente capaz de trabajar con ambas bombas.

Esta alternativa se descartó debido a que no tenía sentido aumentar la potencia de la instalación sin antes construir un sistema estable que la controle.

### 2.2.2 Modificar el funcionamiento de la bomba de baja presión

Como se ha comentado en los antecedentes, la bomba de baja presión (BP) está en continuo funcionamiento y, además, lo hace a su presión máxima. Esto supone varios aspectos negativos para instalación.

El primero de ellos es que, al estar en funcionamiento permanente, la bomba se va calentando cada vez más a medida que pasa el tiempo. Este calor liberado por la bomba se transmite al combustible almacenado en el depósito, ya que se encuentra sumergida en él. Para solucionar este problema se extraerá la bomba del depósito y se colocará en la misma estructura donde irán montados el resto de los elementos del sistema de inyección.

En segundo lugar, la vida útil de la bomba es menor si se encuentra funcionando sin descanso. Para evitar esto, se van a añadir dos nuevos elementos a la instalación: un presostato y un acumulador hidráulico (calderín). Parte del combustible impulsado por la bomba de BP se introduciría en el calderín hasta alcanzar una presión máxima determinada, que es detectada por el presostato. Mediante un relé se enviaría una señal eléctrica que desconectaría la bomba. Ahora, la bomba de AP sería alimentada con el combustible que ha quedado almacenado en el calderín. En el momento en el que el presostato detecte que la presión del calderín ha superado un valor mínimo, el relé volvería a emitir una señal para conectar de nuevo la bomba. Y así continuamente. Con esto, además de mejorar el funcionamiento de la bomba de BP, se consigue entregar el Diesel a la bomba de AP de una forma mucho más precisa y controlada.

Por último, el depósito de almacenamiento que usa la maqueta es una garrafa de plástico de 10 litros, por lo que, sería necesario diseñar un depósito de acero que incorpore un sistema de refrigeración propio.

Para este proyecto se ha decantado realizar esta alternativa.

A continuación, se va a explicar el funcionamiento del acumulador hidráulico y del presostato a fin de entender mejor el estudio de este trabajo. Y se presentará un diagrama simplificado de la instalación después de incluir los nuevos elementos.

- **Acumulador hidráulico o calderín.** Su objetivo es almacenar una cantidad de fluido a presión. Se usa para acumular energía, amortiguar los picos de presión, lograr un aumento de presión gradual o mantener la presión en un valor constante. Suele utilizarse en instalaciones con caudal constante para reforzar la presión hidráulica o como alimentación de fluido en caso de que la bomba falle. [5]

Se trata de un recipiente metálico en cuyo interior hay un gas (en este caso, nitrógeno) y el fluido que queremos acumular (Diesel), separados por una membrana, vejiga o pistón. A medida que el fluido se va introduciendo en el calderín, el volumen del gas se reduce, incrementándose su presión. Cuando la presión del gas alcanza un valor determinado se corta el flujo del fluido y se invierte el proceso. El fluido pierde presión y el gas se expande ocupando el volumen del fluido, que es expulsado del acumulador. Cuando la presión del gas disminuye lo suficiente se reanuda de nuevo el flujo de fluido. En la Figura 2.1 se muestra el funcionamiento.

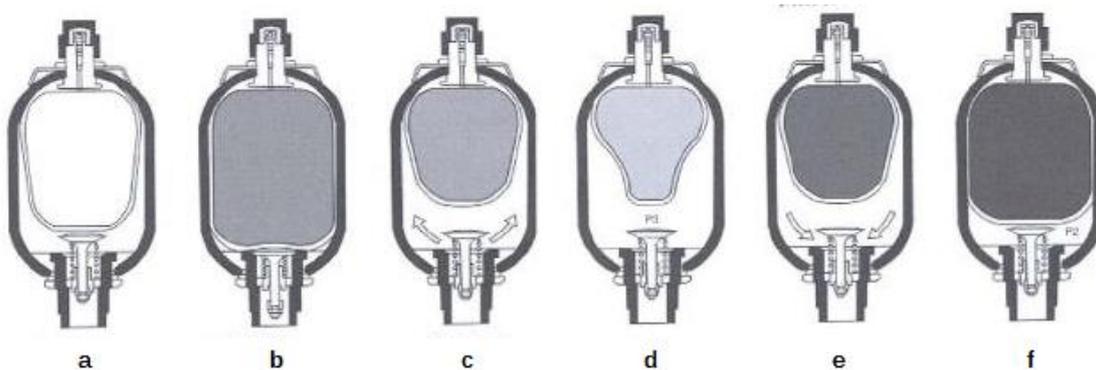


Figura 2. 1: Funcionamiento de un acumulador hidráulico tipo vejiga. a) sin nitrógeno. b) cargado únicamente con nitrógeno. c) carga del fluido. d) presión máxima del nitrógeno. e) descarga del fluido. f) presión mínima del nitrógeno. [6]

El acumulador hidráulico que se ha obtenido es el modelo *A1 5 lts. 10Kg/cm. 3/4'' HMF-HIDROCARBURO* de la empresa *INDUSTRIAS IBAIONDO, S.A.*

- **Presostato.** Comúnmente se le conoce como interruptor de presión y se encarga de abrir o cerrar un circuito eléctrico en función del valor de presión leído.

Su funcionamiento suele ser eléctrico-mecánico. El fluido ejerce una presión sobre un muelle central que empuja un pistón hasta que éste consigue unir dos contactos. Cuando la presión que ejerce el fluido es mayor que la del muelle, los contactos modifican su posición. Y, cuando

ocurre lo contrario, el muelle envía el pistón en sentido contrario, volviendo a modificar la posición de los contactos.

Mediante un tornillo se puede ajustar su sensibilidad de disparo (presión de encendido y presión de apagado) mediante la fuerza aplicada sobre el pistón a través del muelle. El diagrama de funcionamiento de un presostato mecánico se muestra en la figura 2.2.

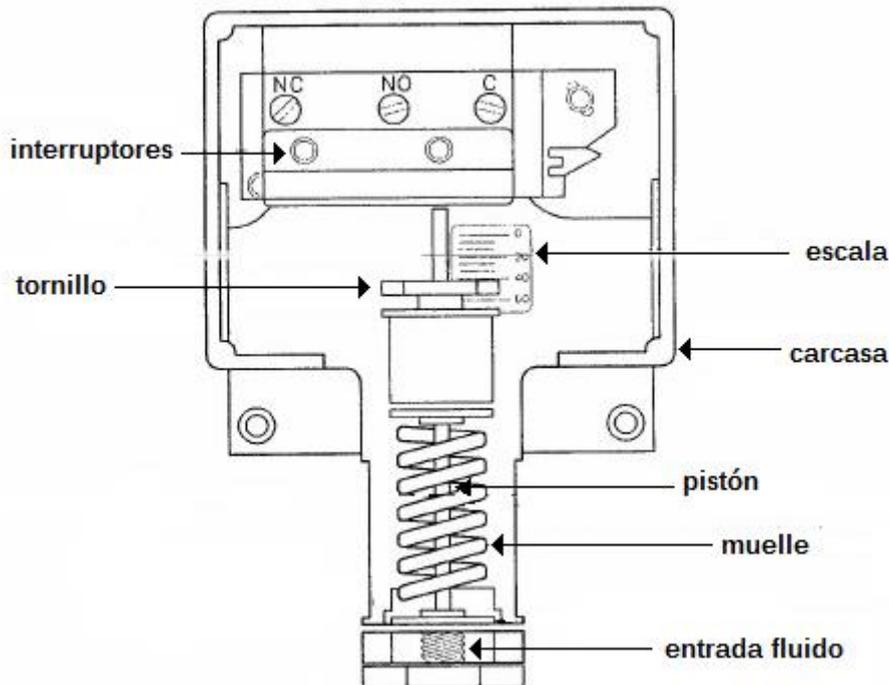


Figura 2. 2: Diagrama de funcionamiento de un presostato de pistón. [7]

El presostato que se ha utilizado es el modelo *Barksdale DT2-GH150SS* de la empresa *Técnica de Fluidos*.

### 2.3 Vista previa simplificada del diseño de la instalación

En la Figura 2.3 se muestra, de una forma muy simplificada, la instalación final del sistema de alimentación de Diesel. El presostato seguido del acumulador hidráulico se colocará entre el filtro de combustible y la bomba neumática de AP. A la salida de esta bomba se colocará un depósito de AP que suministrará combustible al raíl.

Las ventajas de la nueva instalación, como ya se han comentado en apartados anteriores, son: que no es necesario un mantenimiento tan riguroso, existe un mejor control del flujo de Diesel, la bomba de BP trabajará más eficientemente y se reducirán las vibraciones y los ruidos del sistema.

El diseño real de la instalación se muestra más adelante en la Figura 4.1, en el cual se han montado los distintos elementos del sistema sobre una estructura de aluminio anodizado.

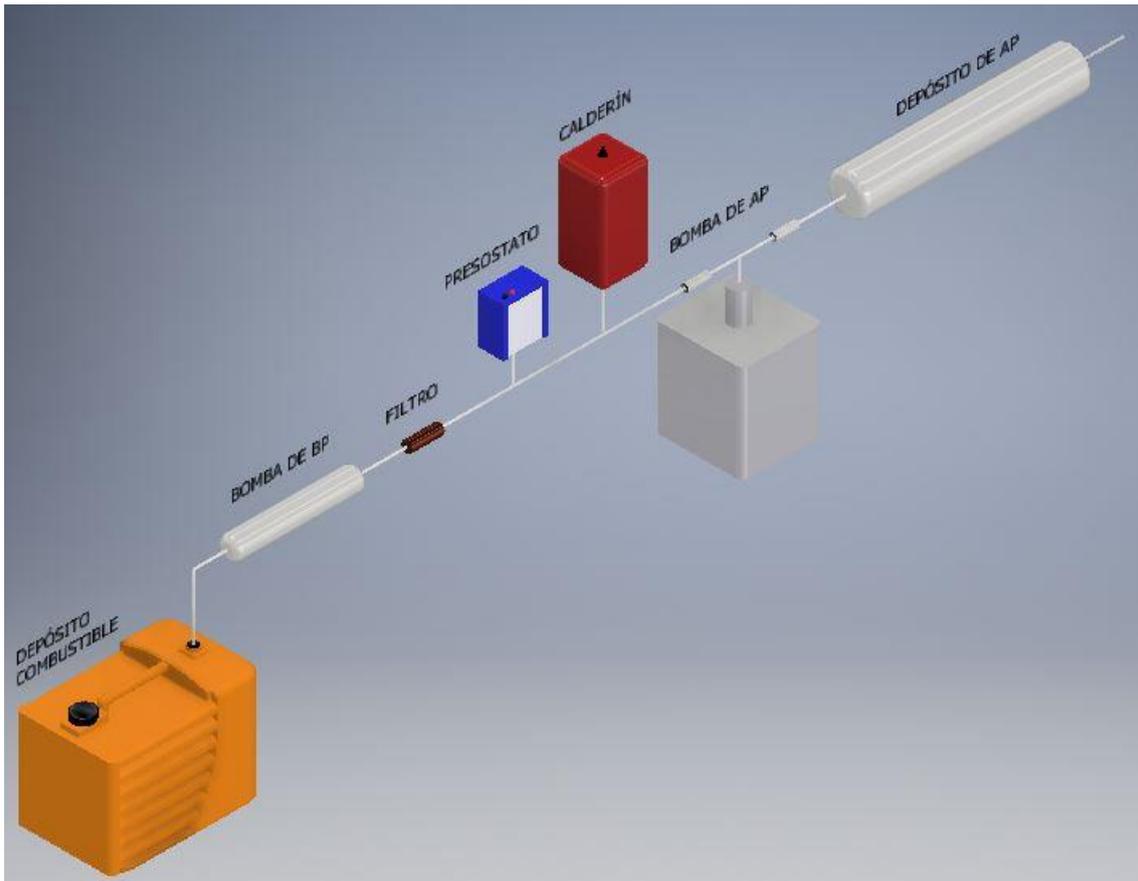


Figura 2. 3: Diseño simplificado de la instalación a diseñar.

El circuito neumático de este diseño es el siguiente:

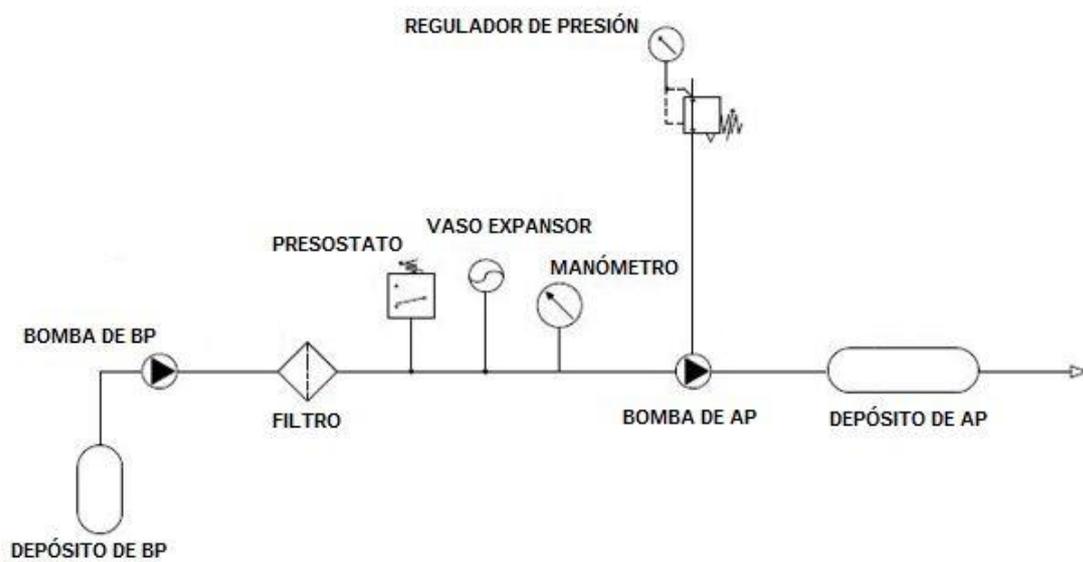


Figura 2. 4: Circuito neumático de la instalación de alimentación de combustible a diseñar.

## 2.4 Importancia de la presión en el sistema de inyección

Al comienzo del año 2000, la concienciación sobre el medio ambiente empezó a tomar fuerza y surgió una presión, cada vez mayor, sobre las emisiones contaminantes y sobre el CO<sub>2</sub> que emitían los vehículos. Hoy en día existen sistemas para reducir el impacto de los combustibles fósiles empleados en los motores, como el uso de biocombustibles, motores flexi-fuel, hibridación o soluciones para el tratamiento de las sustancias generadas como el uso de los catalizadores o filtros.

Por otro lado, el cliente busca un vehículo con un motor potente y que además no consuma en exceso. Realmente, el consumidor entiende la potencia como un modo de diversión, o incluso piensa que a mayor potencia mejor serán las prestaciones del vehículo. Esto no es del todo cierto, ya que para que un automóvil circule a una velocidad constante de 120 km/h sobre una carretera sin pendiente, solo es necesario entre 25 y 30 caballos de potencia (CV), el resto se emplea principalmente en aceleración. [8]

Por lo tanto, la evolución que ha experimentado el motor de automoción se debe a factores tecnológicos, medioambientales y sociales. Tanto el cliente como el fabricante tienen como objetivo maximizar la potencia entregada por el motor y minimizar el consumo de combustible, cumpliendo con la normativa de emisiones contaminantes y ruido. Obviamente, conseguir las tres condiciones es prácticamente imposible, por lo que se adopta un equilibrio.

El trabajo realizado en este proyecto tiene importancia en este contexto ya que mejorar el sistema de inyección supone un aumento en la potencia, reduce el tiempo de la combustión y se optimiza el gasto de combustible reduciendo su consumo y reduciendo, por tanto, las emisiones contaminantes. Como consecuencia, asegurar una buena alimentación de combustible supone una mejora en el sistema de inyección, que es la parte de la instalación donde se inicia todo el proceso.

A continuación, se va a explicar cómo influye la presión con la que se inyecta el combustible en el interior del cilindro sobre la potencia, el consumo de combustible y emisiones contaminantes de un vehículo.

### 2.4.1 Influencia sobre la potencia

Los vehículos invierten la potencia entregada por el motor en vencer varias fuerzas: [8]

- Inercia lineal del automóvil:  $F_i = m_v \frac{du}{dt}$
- Pendiente de la carretera y peso del automóvil:  $F_p = m_v g \cdot \sin \theta$
- Fuerza aerodinámica:  $F_d = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A_F \cdot \rho_a \cdot u^2$
- Fuerza de rodadura:  $F_r = m_v g \cdot C_{rr}$
- Pérdidas en la transmisión:  $F_t = a_1 \cdot u$

Siendo:

- $m_v$ : masa del vehículo
- $u$ : velocidad lineal del vehículo
- $\theta$ : pendiente de la vía
- $C_D$ : coeficiente aerodinámico
- $A_F$ : área de referencia
- $\rho_a$ : densidad del aire
- $C_{rr}$ : coeficiente de rodadura
- $a_1$ : coeficiente de pérdidas

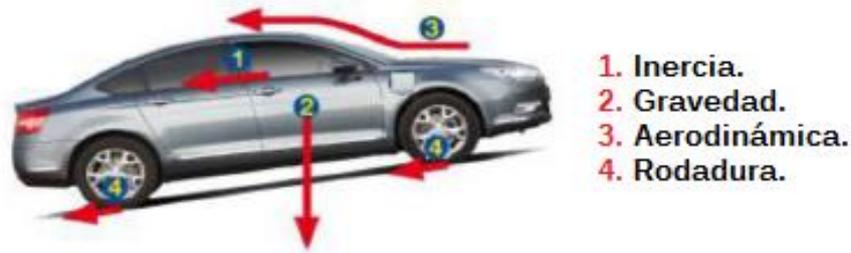


Figura 2. 5: Principales fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento. [8]

➤ En régimen transitorio:

$$F_{carga} = m_v \frac{du}{dt} + m_v g \sin \theta + \frac{1}{2} C_D A_F \rho_a u^2 + m_v g \cdot C_{rr} + a_1 \cdot u \quad (2.1)$$

La inercia lineal es el término de mayor peso, ya que para que el vehículo proporcione una gran aceleración, se necesita una potencia elevada (F) que sea capaz de vencer esa inercia. Por otro lado, la resistencia aerodinámica también absorbe gran parte de la energía mecánica, puesto que depende del cuadrado de la velocidad.

➤ En régimen estacionario:

$$F_{carga} = \frac{1}{2} C_D A_F \rho_a u^2 + m_v g \cdot C_{rr} + a_1 \cdot u \quad (2.2)$$

El vehículo circula a velocidad lineal constante por lo que no experimenta aceleración, siendo nulo el término  $F_i$ . Y se supone también que la vía por la que circula no tiene pendiente, siendo nulo el término  $F_p$ .

En cualquier caso:

$$N_{carga} = F_{carga} \cdot u = N_{motor} \quad (2.3)$$

Por otro lado, la expresión de la **potencia efectiva** desarrollada se define como: [8]

$$N_{ef} = n \cdot i \cdot \eta_{ef} \cdot F_r \cdot F_e \cdot PCI \cdot V_T \cdot \rho_{ref} \cdot \eta_v \quad (2.4)$$

Siendo:

- $N_{ef}$ : potencia efectiva
- $n$ : régimen de giro
- $i$ : número de ciclos por revolución
- $\eta_{ef}$ : rendimiento efectivo
- $F_r$ : dosado relativo
- $F_e$ : dosado estequiométrico
- PCI: poder calorífico inferior del combustible
- $V_T$ : cilindrada total
- $\rho_{ref}$ : densidad de referencia
- $\eta_v$ : rendimiento volumétrico

Existe una relación entre todos estos parámetros de forma que al modificar alguno de ellos se verán afectados otros, por ejemplo, si incrementamos el régimen de giro por encima de un valor límite (distinto para cada tipo de motor) se reducirían los rendimientos mecánico y volumétrico.

### Consecuencias de optimizar el proceso de inyección:

Si optimizamos el sistema de inyección Diesel de los MEC podemos reducir el tiempo que tarda en realizarse el proceso de combustión y centrar la combustión.

La velocidad del proceso de combustión depende de la velocidad de inyección, que se consigue aumentar inyectando a mayor presión. Los sistemas actuales suelen inyectar el combustible entre 1800 – 2000 bar [8], por lo que, nuestra maqueta es capaz de superarlos, alcanzando los 2800 bar.

La ecuación de la masa de combustible inyectada por cilindro y ciclo se define, a partir de las ecuaciones de continuidad y de Bernoulli, como: [9]

$$m_{fcc} = m_{teórica} \cdot C_D \cdot t_i \quad (2.5)$$

Siendo  $m_{fcc}$  la masa real que ha sido inyectada por cilindro y ciclo,  $m_{teórica}$  el gasto másico teórico inyectado,  $C_D$  el coeficiente de descarga y  $t_i$  el tiempo que ha durado la inyección. A su vez, cada término puede descomponerse aún más.

$$m_{teórica} = \rho_f \cdot u_{teórica} \cdot A_0 \quad (2.6)$$

Siendo  $\rho_f$  la densidad del fluido inyectado (en este caso Diesel),  $u_{teórica}$  la velocidad teórica de la inyección y  $A_0$  el área total de salida de los orificios de inyección.

Puesto que la presión de inyección influye en la velocidad a la que el fluido es inyectado en el cilindro, la velocidad teórica de la inyección se puede expresar en función de la presión como:

$$u_{teórica} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_f}} \quad (2.7)$$

Siendo  $\Delta P$  la diferencia de presión que existe entre el fluido y el cilindro ( $\Delta P = P_{fluido\_inyectado} - P_{cilindro}$ ) y  $\rho_f$  la densidad del Diesel.

Terminando de desarrollar los términos  $A_0$  y  $t_i$  como:

$$A_0 = \frac{\pi \cdot \phi_0^2}{4} \cdot N_{tobera} \quad (2.8) \quad t_i = \frac{\alpha_i}{2\pi \cdot n} \quad (2.9)$$

$\phi$  : diámetro de los orificios de inyección.

$\alpha_i$ : ángulo de motor que dura la inyección.

$N_{tobera}$ : número de toberas.

$n$ : régimen de giro.

La ecuación final de la masa de combustible inyectada queda como:

$$m_{fcc} = \rho_f \cdot \frac{\pi \cdot \phi_0^2}{4} \cdot N_{tobera} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_f}} \cdot C_D \cdot \frac{\alpha_i}{2\pi \cdot n} \quad (2.10)$$

Esto quiere decir que, manteniendo constante la duración del proceso, al aumentar la presión de inyección conseguimos incrementar el término  $\Delta P$  y con ello la cantidad de masa inyectada en el cilindro. O visto de otro modo, si inyectamos la misma cantidad de masa, conseguimos reducir el tiempo de inyección y hacer el proceso más rápido, lo que nos permitiría aumentar el régimen de giro del motor,  $n$ , así como su rendimiento,  $\eta_{ef}$ .

Como puede verse en la ecuación (2.4) la potencia efectiva aumenta proporcionalmente (o casi, ya que otros términos podrían verse afectados) con el régimen de giro y el rendimiento efectivo, consiguiéndose así uno de los objetivos del mercado, un vehículo más potente.

### 2.4.2 Influencia sobre el consumo

Reducir el consumo de combustible es un aspecto especialmente importante para aquellas empresas que poseen una gran flota de vehículos y que además recorren grandes distancias, ya que supone uno de los mayores costos después de la mano de obra. Aunque, obviamente, también tiene un gran interés en usuarios más pequeños.

Cuando se habla de reducir el consumo, se entiende que para que el motor entregue la misma energía útil se necesita una menor cantidad de combustible, lo que equivale a reducir también las emisiones de CO<sub>2</sub>.

La cantidad de combustible consumido por unidad de tiempo en función de la potencia mecánica desarrollada por el motor se define como *consumo específico efectivo*, cuya expresión es la siguiente: [9]

$$g_{ef} = \frac{\dot{m}_f}{N_e} = \frac{1}{\eta_{ef} PCI} \quad (2.11)$$

Siendo  $\dot{m}_f$  el gasto de combustible,  $N_e$  la potencia efectiva,  $\eta_{ef}$  el rendimiento efectivo y  $PCI$  el poder calorífico del combustible.

En esta ecuación 2.11 se puede apreciar que, manteniendo la potencia efectiva, una reducción del consumo específico implica la necesidad de quemar una cantidad de combustible menor, y, por tanto, una reducción de CO<sub>2</sub> y un aumento en el rendimiento efectivo del motor.

Esto quiere decir que, para reducir el consumo específico de combustible hemos de aumentar el rendimiento efectivo. Teniendo en cuenta que:

$$\eta_{ef} = \eta_{indicado} \cdot \eta_{mecánico} \quad (2.12)$$

Para aumentar los rendimientos indicado y mecánico, existen varias estrategias, que se exponen a continuación.

#### 2.4.2.1 Mejora de la termodinámica

Con esta estrategia se consigue aumentar el rendimiento indicado y se puede llevar a cabo mediante dos técnicas, que son: optimizar el proceso de combustión y la gestión térmica.

Ambas técnicas tienen un efecto directo sobre la potencia efectiva, tal y como se puede ver en la ecuación 2.4.

Básicamente, consiste en reducir el tiempo que tarda en realizarse la combustión o en centrar la combustión alrededor del punto medio superior (PMS). En los MEC, tanto la duración como el centrado de la combustión están controlados fundamentalmente por la inyección, tal y como se puede apreciar en la Figura 2.6.

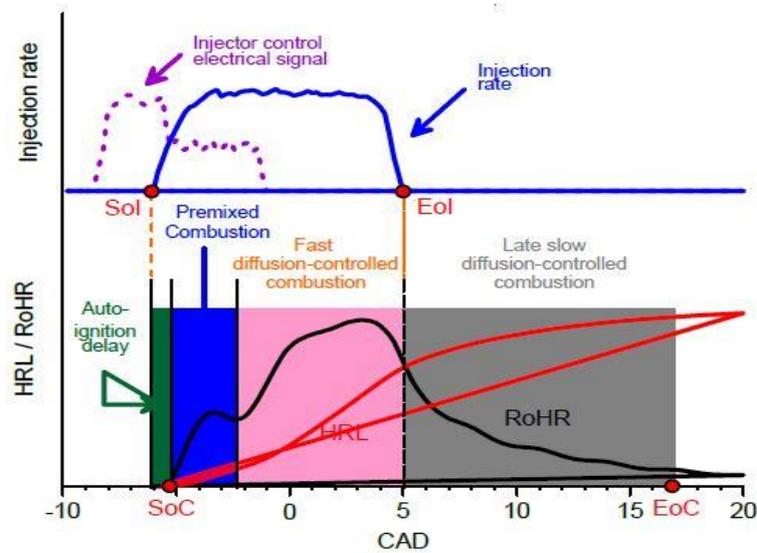


Figura 2. 6: Características del proceso de combustión de un MEC. [10]

Para optimizar el proceso de combustión de un MEC se puede:

**Optimizar la cámara de combustión:** tiene como objetivo reducir la duración de la combustión. Existe una gran interacción entre la geometría del bowl y la geometría del inyector, cuyo efecto es más significativo al final de la etapa de combustión, es decir, al finalizar la inyección. Por otro lado, un buen diseño de la cámara de combustión supone que los chorros y sus respectivas llamas empleen el aire de la mejor forma posible, incrementándose el dosado relativo,  $F_r$ , y con ello la potencia efectiva,  $N_e$ . Esto puede apreciarse en la Figura 2.7. [8]

**Optimizar el sistema de inyección:** por un lado, se puede reducir la duración de la combustión. Esto se puede hacer incrementando la presión de inyección para aumentar así la velocidad de inyección, ya que esta influye sobre la velocidad de combustión. Otra posibilidad consiste en llevar a cabo varias inyecciones por ciclo con el objetivo de gestionar mejor el proceso de mezcla y el uso del aire. A esto se le conoce como inyecciones piloto y post-inyecciones. Pero, puesto que quedan fuera del alcance de este trabajo, no se van a explicar. Y, por otro lado, se puede centrar la combustión. Es decir, el instante en el cual se inicia la inyección del combustible controla el instante en el cual comienza la combustión, a esto se le llama *control del centrado*. [8]

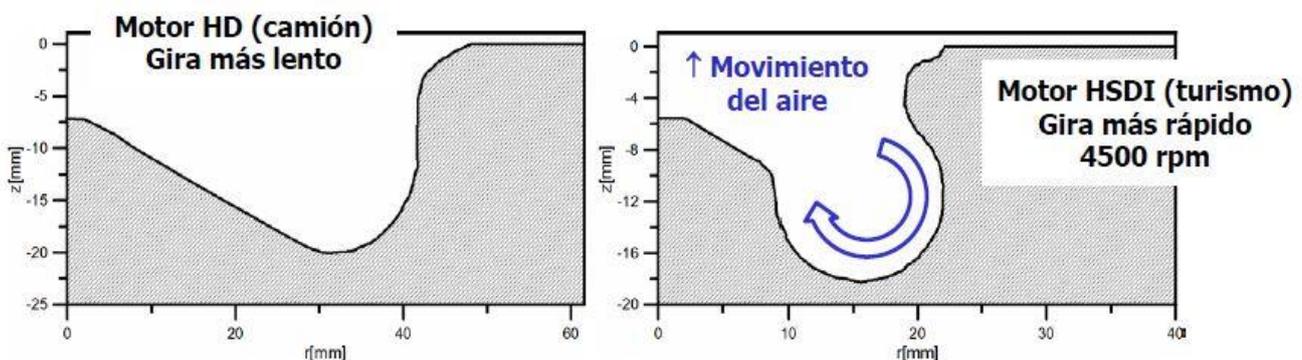


Figura 2. 7: Interacción entre la geometría del bowl y la geometría del inyector. [10]

Cabe destacar, que, aunque se consiga reducir el consumo de combustible con estas técnicas, generalmente entran en conflicto con el control de emisiones.

#### 2.4.2.2 Reducción de las pérdidas mecánicas

Con esta estrategia se consigue aumentar el rendimiento mecánico. Las dos técnicas empleadas actualmente son el *downsizing* y el *downspeeding*.

Además de la expresión 2.4, la potencia efectiva se puede expresar de forma más simplificada como: [8]

$$N_e = pme \cdot zV_D \cdot n \cdot i \quad (2.13)$$

Siendo  $pme$  la presión media efectiva que existe en el pistón en un ciclo,  $zV_D$  la cilindrada total,  $n$  el régimen de giro del motor e  $i$  el número de ciclos por revolución.

El *downsizing* implica reducir la cilindrada total y el *downspeeding* las revoluciones, consiguiéndose en ambos casos aumentar la  $pme$ . A continuación, se explican con más detalles estas técnicas.

**Downsizing:** consiste en la reducción del tamaño del motor. La idea fundamental es que el rendimiento efectivo del motor es considerablemente inferior cuando la presión media efectiva es baja y como consecuencia de esto el consumo específico efectivo se dispara (tal como se aprecia en la ecuación 2.11). Para evitar que el motor opere en esta zona se obliga al motor a trabajar a baja carga. [9]

Con la tecnología *downsizing* se logra reducir el tamaño del motor con el objetivo de conseguir potencias efectivas bajas cuando el motor esté operando bajo condiciones de  $pme$  elevadas. En la Figura 2.8 se puede ver que, para las mismas revoluciones, el motor con *downsizing* utiliza una  $pme$  mayor y un menor consumo (región blanca). Para reducir el tamaño se puede reducir el volumen de los cilindros, el número de cilindros o bien ambas a la vez.

Cabe destacar que no se puede aumentar la  $pme$  de forma ilimitada, ya que las condiciones de presión y temperatura aumentan también y pueden producir la detonación del combustible, especialmente en los MEP, ya que usan gasolina. Además, puede producir el desgaste o fallo de los elementos mecánicos del motor.

Las principales ventajas son: [12]

- Aumento del rendimiento mecánico al incrementar el grado de carga del motor. Se reducen las pérdidas mecánicas.
- Aumento del rendimiento indicado al incrementarse el grado de carga del motor. Se reducen las pérdidas de calor.
- Reducción de las pérdidas mecánicas producidas por la fricción. Al existir una superficie de contacto entre la camisa y el pistón más pequeña y al reducirse el número de válvulas que accionar.

- Aumento de la potencia específica. Al reducirse el tamaño del motor también lo hace su peso y, por lo tanto, la inercia a vencer es menor y se consume menos en los regímenes transitorios.

Y los principales inconvenientes son:

- Para que el motor alcance la misma potencia efectiva es necesario alcanzar una  $pme_{m\acute{a}xima}$  mayor. Esto supone mayores cargas mecánicas y térmicas, mayor probabilidad de producirse picado en el pistón de los MEP o la imposibilidad de realizar el proceso de combustión como consecuencia de una falta de espacio en los MEC.

Para solucionar este problema de la presión media efectiva máxima se recurre a la turbosobrealimentación sumado a un incremento en la presión de inyección. Aunque turbosobrealimentar motores pequeños es bastante complicado debido a que el acoplamiento motor-turbogruppo es difícil. Las medidas necesarias que se deben llevar a cabo en estos casos son: incrementar la presión de sobrealimentación, incrementar la recirculación de gases de escape (EGR), reducir la temperatura en la admisión y en el EGR, incrementar la presión máxima en el interior del cilindro y la presión máxima de inyección. [9]

En cuanto a las emisiones contaminantes, cuando se aplica el EGR aumentan significativamente las partículas debido a que la combustión está dificultada por la falta de espacio.

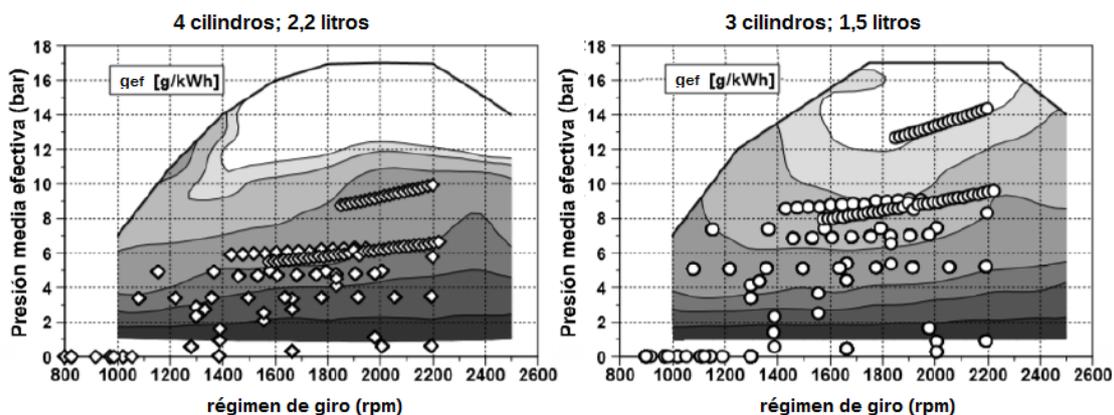


Figura 2. 8: Gráficas de antes y después de aplicar la técnica downspeeding a un motor. [11]

En caso de no poder alcanzar la  $pme_{m\acute{a}xima}$  necesaria para poder mantener la potencia efectiva se puede recurrir a la desconexión de alguno de los cilindros. De esta forma, los que quedan funcionando están obligados a trabajar a una  $pme$  mucho mayor. Esta desconexión se puede conseguir dejando de inyectar en dichos cilindros o dejando las válvulas siempre abiertas.

**Downspeeding:** consiste en la reducción del régimen de giro del motor. Según la ecuación 2.13, para mantener la misma potencia efectiva y se reduce el régimen de giro, se incrementa la  $pme$ . Por lo tanto, la filosofía es exactamente la misma que la explicada en el *downsizing*. Además, puesto que el motor gira más lento las pérdidas mecánicas por fricción son mucho menores. [9]

Esta tecnología se consigue a través de la gestión del cambio de marchas. Es decir, se deben emplear marchas más largas o emplear un cambio automático optimizado. Puesto que no depende de la presión de inyección no se va a entrar más en detalle.

### 2.4.2.3 Recuperación de la energía de escape

Consiste en convertir la energía térmica residual del escape en trabajo mecánico. Esta tecnología es actualmente incipiente por lo que no se encuentra desarrollada. Además, presenta varios problemas, como son: los costes adicionales de equipamiento, problemas de espacio en el vehículo, bajos rendimientos de conversión de calor, etc. [8]

### 2.4.3 Influencia sobre las emisiones contaminantes

La combustión en los MEC es de tipo localizada y se produce por *deflagración por difusión*. La inyección y la combustión se producen simultáneamente, es decir, el combustible se quema a medida que se mezcla y evapora.

La composición de los gases de escape es la siguiente: [12]

- Por combustión de hidrocarburos ideal:  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ .
- Por combustión incompleta: CO y HC.
- Por productos del nitrógeno:  $\text{NO}_x$ .
- Por deshidrogenación y/o absorción de aceite: PM sólidas.
- Por composición del combustible: Óxido de azufre.

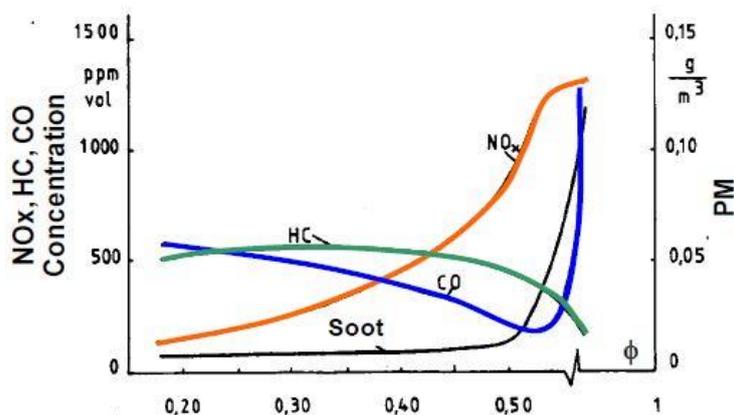


Figura 2. 9: Composición de los gases de escape en un motor MEC. [13]

Para reducir las emisiones de estos contaminantes existen varios métodos o estrategias. Por un lado, están las soluciones activas, que son las que actúan directamente sobre la fuente responsable de la formación de esos contaminantes. Y, por otro lado, están las soluciones pasivas, que son las que tratan los contaminantes una vez se han formado, es decir, el post-tratamiento. [12]

**Soluciones activas:** existen cuatro métodos: modificar las condiciones del sistema de inyección, el EGR, las post-inyecciones y emplear procesos de combustión no convencionales.

Las acciones que se realizan sobre el sistema de inyección pueden ser, o bien aumentar la presión de inyección o reducir el diámetro de los orificios del inyector. Con esto se consigue reducir el dosado al *lift-off* y reducir la formación de partículas. Sin embargo, se produce un aumento de la formación de los HC debida a la sobremezcla. Esto puede apreciarse en la Figura 2.10 izquierda, donde la línea roja hace referencia al proceso convencional de combustión y la línea azul el nuevo proceso.

El EGR consiste en recircular los gases de escape a la admisión, produciéndose una disminución en la concentración de oxígeno. Se consigue reducir la temperatura de la llama, reduciéndose así la formación de  $\text{NO}_x$ . Sin embargo, se produce una peor oxidación de las partículas y del CO. Esto puede apreciarse en la Figura 2.10 centro.

Existen técnicas como el *HCCI* que consiste en realizar una combustión generalizada controlada, que se logra adelantando la inyección. Al ser la combustión generalizada no existe llama de difusión y no se forman partículas. Además, se obtiene una temperatura de llama muy baja, con lo que se produce menos  $\text{NO}_x$ . Sin embargo, se producen más HC, CO y ruido y está limitado a baja carga. Esto puede verse en la figura 2.10 derecha.

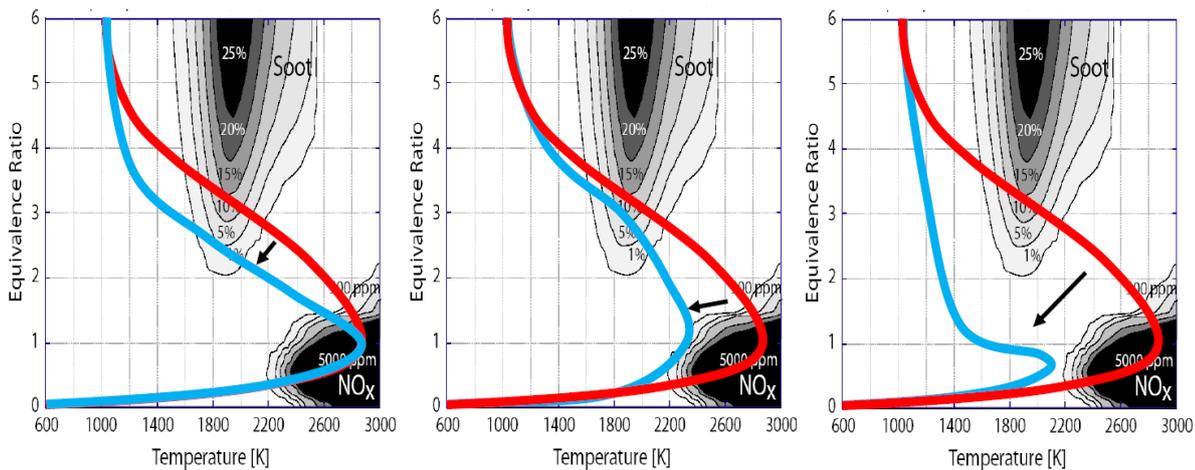


Figura 2. 10: Soluciones activas para reducir las emisiones contaminantes. [14]

**Soluciones pasivas:** para el post-tratamiento se emplean catalizadores de oxidación, filtros de partículas (FAP), las trampas de  $\text{NO}_x$  y la reducción catalítica selectiva (SCR) de los  $\text{NO}_x$ .

En cualquier caso, ninguna de las estrategias pasivas mencionadas está basada en una modificación de la presión de inyección, por lo que no se entrará más en detalle en ellas.

#### 2.4.4 Conclusiones

Hemos visto como la presión de inyección tiene influencia sobre los tres objetivos del mercado de la automoción. Por un lado, se puede aumentar la potencia entregada por el vehículo aumentando el régimen de giro del motor o su rendimiento efectivo. Al aumentar la presión de inyección se puede trabajar con presiones medias efectivas máximas más altas y reducir, por tanto, la cantidad quemada de combustible. Y, por último, con técnicas que modifiquen el proceso de inyección se puede reducir la emisión de contaminantes.

Es por esta razón por la que el CMT realiza ensayos con una instalación que trabaja con presiones de inyección superiores a las de mercado, como es el caso de la bomba neumática de AP de este trabajo.

## Capítulo 3

### MARCO TEÓRICO

En este capítulo se va a introducir al lector en los conocimientos básicos, pero necesarios, para comprender los fundamentos teóricos del motor y de la importancia del sistema de inyección en sus prestaciones. Se hará especial hincapié en los Motores de Combustión Interna Alternativa (MCIA) ya que es el campo de estudio de este TFG, y dentro de estos, en los Motores de Encendido por Compresión (MEC).

#### 3.1 Introducción

Un motor térmico es una máquina térmica que obtiene energía mecánica a partir de la transformación de la energía calorífica. Esta energía calorífica se obtiene mediante la combustión de combustibles líquidos y gaseosos, como el Diesel, la gasolina o el gas natural, y el trabajo útil generado proviene del movimiento de unos órganos que pueden tener un movimiento rotativo, alternativo o, incluso a veces, debido al empuje de un chorro de gas. Cuando la combustión tiene lugar fuera del motor térmico es externa y cuando se quema el combustible en su interior es interna. [15]

El fluido de operación está formado por una mezcla de combustible y comburente. Los combustibles más empleados en la automoción son el gasoil y la gasolina, y el comburente, que es el encargado de suministrar a la mezcla la cantidad de oxígeno necesaria para producir la combustión, suele ser aire atmosférico.

#### 3.2 Clasificación y principio de funcionamiento de los MCIA

Existen dos formas de provocar esa combustión, mediante un aporte de energía externo (Motores de Encendido Provocado, MEP) o mediante el autoencendido del combustible (Motores de Encendido por Compresión, MEC). En cuanto al principio de funcionamiento, ambos motores siguen las mismas cuatro etapas, que se detallan a continuación y pueden verse en la Figura 3.3. [9]

- **Admisión:** Se abre la válvula de admisión y el pistón desciende aspirando la mezcla aire-combustible en los MEP o solo aire en los MEC.
- **Compresión:** Cuando el pistón ha alcanzado su posición más baja vuelve a ascender, comprimiendo el gas (en el caso de los MEC se inyecta combustible al final de esta etapa).
- **Explosión/expansión.** La mezcla aire-combustible se enciende y empuja con fuerza el pistón hacia abajo, obteniendo trabajo útil.
- **Escape.** Se abre la válvula de escape y durante el ascenso del pistón los gases de la combustión se extraen del cilindro. Y vuelve a comenzar el ciclo.

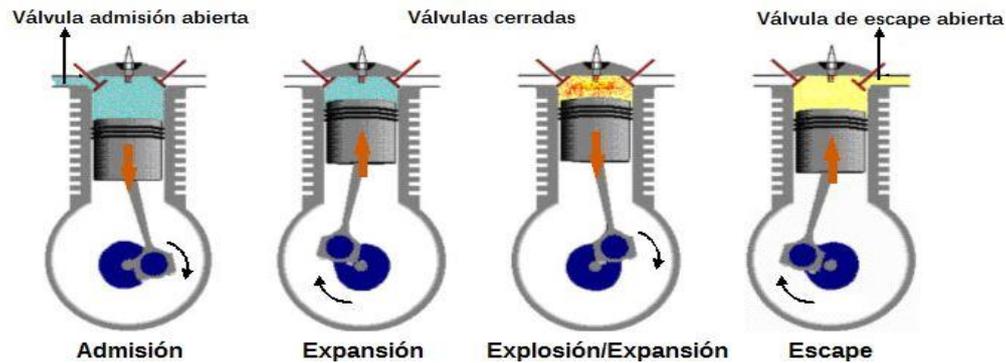


Figura 3. 1: Diagrama de un motor MEP de 4 tiempos. [16]

### 3.2.1 Motores de encendido provocado (MEP)

La diferencia principal de este tipo de motores es que la combustión se realiza gracias a una bujía que hace saltar una chispa entre sus dos electrodos en el momento más adecuado para conseguir la máxima eficiencia del proceso de combustión.

Este proceso de combustión tiene lugar como consecuencia de un frente de llama que avanza recorriendo toda la cámara de combustión quemando la mezcla aire-combustible, que en este caso es gasolina. Esta mezcla suele ser homogénea, es decir, se produce fuera del cilindro y se introduce durante la admisión (combustión premezclada), por lo tanto, a mayor régimen de giro más carreras realiza el pistón y el motor es capaz de sacar más potencia. También se puede introducir aire en el interior del cilindro durante la etapa de admisión e inyectar el combustible durante la posterior etapa de compresión, siendo, por tanto, una mezcla heterogénea (combustión por difusión). En ambos casos, la cantidad de mezcla es controlada por una válvula de mariposa que estrangula la admisión de forma que exista siempre la misma relación aire-combustible en todos los ciclos, provocando grandes pérdidas cuando el grado de carga es bajo. [17]

### 3.2.2 Motores de encendido por compresión (MEC)

En este caso, el proceso de combustión tiene lugar debido a las condiciones de elevada presión y temperatura, químicamente inestable, que alcanza la mezcla en la etapa de compresión, produciéndose su autoencendido.

El combustible empleado es Diesel y la mezcla aire-combustible es heterogénea (se realiza en el interior del cilindro a medida que se inyecta el combustible). Además, la carga del motor puede controlarse simplemente variando la cantidad de combustible inyectado, en función de la potencia demandada, sin necesidad de modificar la cantidad de aire admitido.

Al contrario de lo que ocurre en los MEP, la combustión no depende del régimen de giro. Al inyectarse el combustible al final de la etapa de compresión, se necesita un tiempo para que se mezcle con el aire. Si aumentásemos las revoluciones en exceso reduciríamos el tiempo de formación de la mezcla y podrían no darse las condiciones necesarias para el autoencendido. Tampoco existe una zona definida donde se origine la combustión, sino que existen varios frentes de llama, que se originan preferentemente en aquellos lugares donde el dosado local es próximo al estequiométrico. [17]

### 3.2.2.1 Inyección del combustible y formación de la mezcla

Para comprender como se realiza la formación de la mezcla aire-diesel en los motores MEC es preciso entender cómo funcionan los sistemas de inyección y analizar el flujo de este combustible en el interior de los orificios de descarga de las toberas de los inyectores.

Para lograr que el proceso de combustión tenga lugar con un rendimiento elevado y además genere las mínimas emisiones contaminantes, debe existir una ley de inyección perfectamente definida. Por otro lado, para evitar que el autoencendido se produzca antes de lo debido, el proceso de formación de la mezcla ha de realizarse en un período corto de tiempo. Esto se consigue inyectando el combustible directamente en el interior de la cámara de combustión cuando el pistón está finalizando la carrera de compresión, de modo que el combustible no esté en contacto con el aire mucho tiempo. Esto supone grandes exigencias al sistema de inyección, que debe ser capaz de realizar la atomización, mezcla con el oxidante y combustión en un período muy corto de tiempo. Esta es una de las razones por las que el régimen de giro de los MEC es limitado. [17]

En los motores Diesel existen dos tipos diferentes de sistemas de inyección: la indirecta (IDI) y la directa (DI). En los sistemas IDI es el aire el que busca al combustible. El aire está confinado en una precámara y, posteriormente, se inyecta el combustible a una presión marginal, por lo que estos sistemas de inyección no son muy sofisticados. Mientras que en los sistemas DI es el combustible el que busca el aire. El aire se encuentra ya en el interior del cilindro, que ha sido admitido durante la etapa de admisión e introducido mediante un compresor, y al final de la etapa de compresión se inyecta el combustible a muy elevada presión. En la Figura 3.2 se muestran estos dos sistemas de inyección. [9]

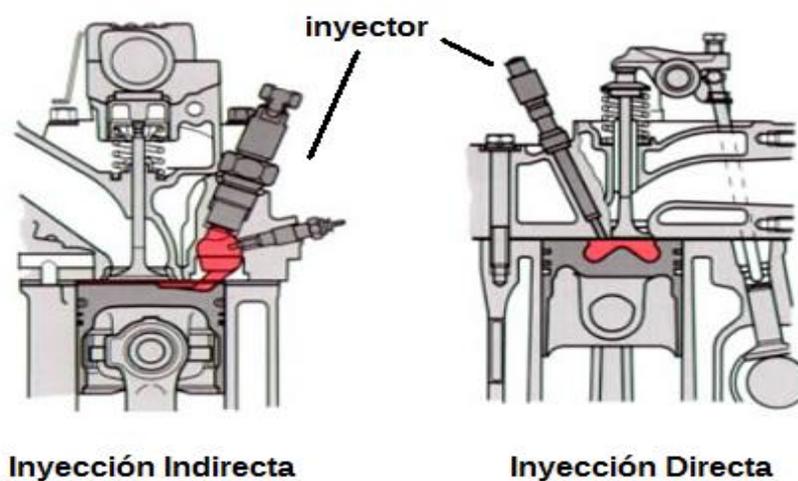


Figura 3. 2: Sistemas de inyección. [18]

Actualmente, en el mercado de la automoción los sistemas IDI están cada vez más en desuso ya que tienen un rendimiento notablemente inferior a los sistemas DI, que se debe a unas mayores pérdidas de calor como consecuencia de la mayor relación superficie/volumen. Además, los sistemas DI suelen ir acompañados de un movimiento de rotación (swirl) del aire alrededor del eje del cilindro, provocado por un mejor diseño en la pipa de admisión. Actualmente, los más empleados son: el sistema *Common-Rail* y el sistema inyector bomba.

### Sistema Common-Rail

De los dos sistemas, este ocupa una mejor posición en el mercado debido a su flexibilidad y versatilidad. La maqueta de la bomba de alta presión de este proyecto emplea este sistema para simular inyecciones de combustible por encima de los 2800, por lo que explicaremos en detalle su funcionamiento, así como los elementos constructivos que la constituyen.

Como puede apreciarse en la Figura 3.3, el circuito comienza en el depósito de combustible y una bomba de BP impulsa el gasoil hasta alimentar a la bomba de AP. A su vez, mediante el cigüeñal del motor, la bomba de AP trasiega el gasoil hacia los distintos inyectores a través del raíl, que además dispone de un conducto para el retorno del Diesel sobrante. En el raíl permanece en todo momento combustible presurizado al valor de una consigna y cuyo volumen es suficiente para abastecer a todos los inyectores del raíl. Como puede observarse en el diagrama, una parte del combustible que recibe el inyector es inyectado en la cámara de combustión, pero existe otra pequeña parte que se emplea para el pilotaje hidráulico de los inyectores, que retorna finalmente al depósito de combustible.

Además de ser un volumen acumulador, el sistema *Common-Rail* tiene la función de elemento amortiguador. La bomba de AP genera oscilaciones de presión debido a las emboladas de sus pistones y la rápida salida de combustible, a través de los orificios de descarga de los inyectores, provoca perturbaciones. Ambas anomalías son apaciguadas por el raíl.

Al principio del raíl existe un captador de presión, es decir, un sensor encargado de medir la presión del combustible en el interior del raíl. Mediante la Unidad de Control Electrónico (ECU) se compara la señal obtenida con un valor de consigna establecido por el usuario y abre o cierra un orificio de descarga situado al final del raíl (limitador de presión) hasta que ambos valores sean iguales. También existe un canal de retorno para el caudal de combustible excedente en él. Además, la ECU se encarga de abrir y cerrar los inyectores en unos instantes definidos, de forma que se controla la duración y la cantidad de combustible inyectada. [9]

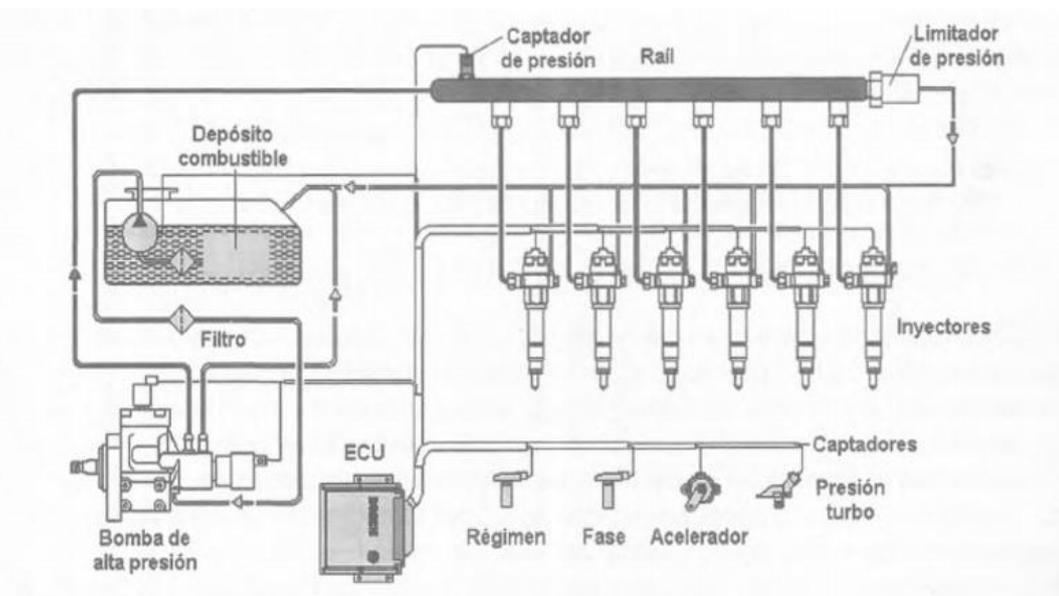


Figura 3. 3: Diagrama del sistema Common-Rail. [19]

Una vez entendido el diagrama del sistema de inyección se va a explicar cada uno de los elementos constructivos que lo forman, que serán los mismos que los de nuestra maqueta. Se va a explicar primero la parte de baja presión, que es la parte en la que se centra este trabajo, que está compuesta por: el depósito de combustible, un filtro previo, la bomba de BP, un filtro de combustible y tuberías de baja presión.

- **Depósito de combustible.** Es un volumen de almacenamiento seguro de combustible, el cual se encuentra a presión atmosférica. Suelen ir equipados con un indicador de nivel para determinar la cantidad de combustible, y en algunos casos disponen de sensores de presión y temperatura. En la automoción, cada depósito tiene un diseño específico para optimizar el espacio y suelen ser de polietileno de alta densidad o de metal, debido a su dureza.
- **Bomba de baja presión.** Tiene como objetivo alimentar con el combustible necesario a la bomba de alta presión. Puede ser eléctrica, sumergida o externa, o mecánica, la cual se encontraría integrada en la bomba de AP.

Actualmente, las bombas de accionamiento electrónico (electrobombas) son de rodillos y las de accionamiento mecánico son de engranajes:

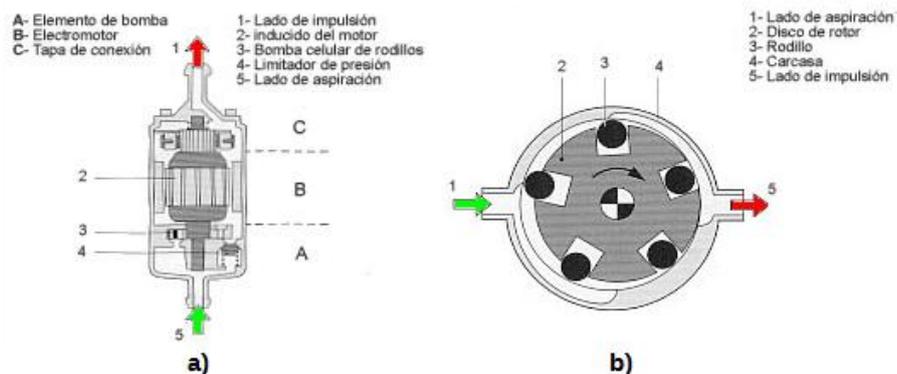


Figura 3. 4: a) electrobomba de combustible. b) esquema de la bomba celular de rodillos [20]

### Electrobomba de combustible

La bomba funciona de forma continua e independiente del régimen de giro del motor, por lo que, el combustible es continuamente transportado desde el depósito hasta la bomba de AP pasando a través de un filtro de combustible. A través de una válvula de descarga, retorna el excedente de combustible al depósito. Además de suministrar combustible es capaz de interrumpir el suministro en caso de necesidad. Actualmente, su uso está limitado a turismos o vehículos industriales ligeros.

En la Figura 3.4 a) aparecen los elementos fundamentales de los que consta esta bomba. El “elemento de la bomba” para el sistema *Common-Rail* está ejecutado como una bomba celular de rodillos. Un disco ranurado gira en el interior de una cámara excéntrica y cada ranura

dispone de un rodillo. Cuando los rodillos son empujados contra la pista de deslizamiento, debido a la presión del combustible y a la rotación del disco, se forma una cámara entre cada dos rodillos consecutivos, produciéndose el bombeo de combustible a medida que se reduce su volumen. Cuando el combustible llega al lado de impulsión este penetra en el electromotor. El electromotor es un sistema de imán permanente inducido. Y, por último, la tapa de conexión, que es donde están alojadas las conexiones eléctricas de la electrobomba. [21]

### Bomba de combustible de engranajes

El funcionamiento de las bombas de engranaje sí depende del número de revoluciones del motor y lo hace de forma aproximadamente proporcional. Por esto, para poder controlar el caudal entregado por la bomba se coloca una válvula de estrangulamiento en la admisión o una válvula de descarga en la impulsión. Se emplea para todoterrenos o vehículos industriales más pesados. Suele estar acoplada a la bomba de AP compartiendo accionamiento, o bien se fija directamente en el motor con el suyo propio. [9]

Como puede apreciarse en la Figura 3.5, los engranajes se tratan de dos ruedas dentadas, una de ellas accionada por el eje de la propia bomba (rueda motriz) y la otra impulsada en sentido contrario de forma libre (rueda arrastrada). El combustible es transportado desde el lado de aspiración al lado de impulsión a través de los huecos que queda entre los dientes de ambas ruedas como consecuencia de una depresión, que además evita que retorne el líquido a la admisión.

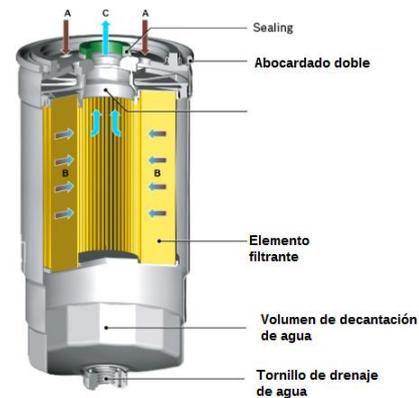
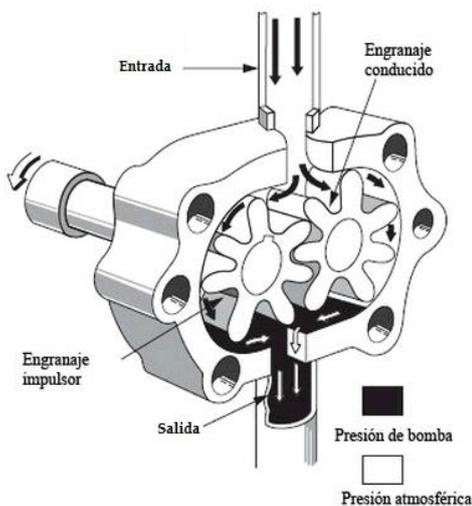


Figura 3. 5: Bomba rotativa de engranajes externos [22]. Figura 3. 6: Funcionamiento de un filtro Diesel. [23].

- **Filtro de combustible.** El objetivo principal de este elemento es proteger el sistema de inyección. Se basa en un papel de filtrado que evita que pasen las impurezas a través de él, además del agua que puede contener el combustible como consecuencia de la condensación producida por un cambio de temperatura. El filtro de Diesel debe tener un poder de filtración superior al de gasolina ya que el sistema de inyección Diesel es más delicado a la suciedad y

contaminación que pueda entrar. En la Figura 3.6 se muestra el diagrama de funcionamiento de un filtro Diesel. [9]

- **Tuberías de baja presión.** La presión que se alcanza en esta parte de la instalación está por debajo de 10 bar por lo que suelen ser conductos gruesos de plástico o metal.

Una vez entendida la parte de baja, se explicará la parte de alta presión, que está formada por: la bomba de AP con un manoregulador, el raíl acumulador con un sensor de presión y una válvula limitadora de presión, los inyectores, las tuberías de alta presión y los conductos de retorno de combustible.

- **Bomba de alta presión con manoregulador.** Este es el elemento de separación entre ambas partes y se encarga de suministrar el combustible presurizado durante todo el ciclo de trabajo. En los vehículos convencionales suele ir montada en el mismo lugar que el motor, el cual acciona la bomba mediante un acoplamiento (cadena o correa dentada) siendo, por tanto, dependiente del régimen de giro del motor.

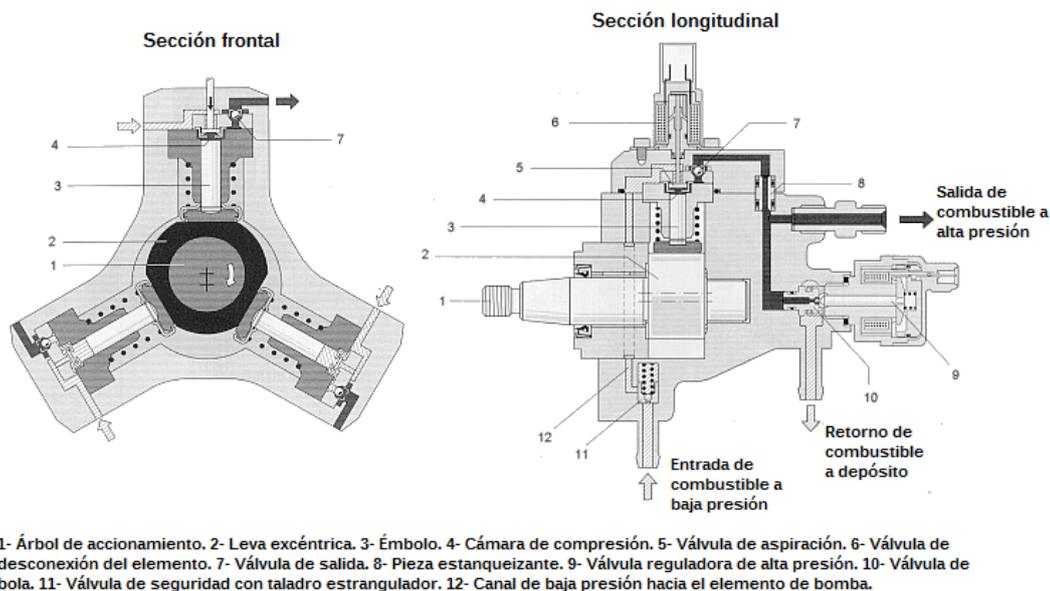


Figura 3. 7: Esquema de una bomba de alta presión de 3 émbolos. [24]

La bomba empleada en sistema de inyección *Common-Rail* es una bomba de émbolos equidistantes, lo que supone una ventaja significativa frente los sistemas convencionales, ya que estos emplean bombas rotativas que disponen de un par de accionamiento nueve veces mayor. En la Figura 3.7, se presenta el esquema de la bomba. En su interior existen tres émbolos desfasados  $120^\circ$  entre sí, que son movidos a través de una leva excéntrica y se encargan de comprimir el combustible. [21]

La bomba de BP envía el combustible hacia la válvula de seguridad (11) de la bomba de AP, que es estrangulado cuando la atraviesa e impulsado hacia el circuito de refrigeración y lubricación de la bomba. Mediante la leva excéntrica (2), el árbol de accionamiento (1) mueve los 3 émbolos (3) de forma ascendente y descendente. Si la presión que existe en el suministro alcanza un valor superior a la presión de apertura de la válvula de seguridad, la bomba es capaz de impulsar el combustible por medio de la válvula de entrada hacia el espacio del elemento el cual se mueve hacia abajo (carrera de aspiración). La válvula de entrada se cierra cuando se ha sobrepasado el punto muerto inferior (PMI), quedando encerrado el combustible que será comprimido solo cuando se supere la presión en el suministro de la bomba previa. Por otro lado, cuando la presión que existe en la válvula de salida (7) es la misma que la que existe en el raíl, el combustible presurizado penetra en el circuito de alta presión. Cuando el émbolo alcanza el punto muerto superior (PMS) éste desciende y deja de enviar combustible (carrera de suministro). A partir de este momento, la presión comienza a caer y la válvula de salida se cierra. En el momento en el que en la cámara de aspiración o compresión la presión es menor a la presión de la bomba de BP, se vuelve a abrir la válvula de entrada y se repite de nuevo el ciclo. [21]

Este tipo de bombas están diseñadas para impulsar elevados caudales, por lo que la propia bomba dispone de una válvula reguladora de presión encargada de mantener el raíl a una presión de consigna (la cual varía en función del grado de carga del motor en cada momento) y de retornar al depósito el exceso de combustible existente. Esto supone un inconveniente sobre el rendimiento del sistema: el combustible retornado se encuentra comprimido y durante el retorno al depósito se descomprime perdiendo la energía aportada en la etapa de compresión, aumentando además la temperatura del gasoil almacenado.

- **Acumulador de alta presión (raíl).** Puesto que la entrada de combustible desde la bomba de AP al raíl es continua se consigue mantener la presión constante en su interior, incluso cuando se están extrayendo cantidades de combustible elevadas. En servicio normal puede alcanzar una presión máxima de 2800 bar.

El raíl dispone de un sensor de presión que suele colocarse al principio o a mitad de este, el cual debe medir con total exactitud y rapidez la presión del raíl. Como puede apreciarse en la Figura 3.8 b), el combustible se cuela por el orificio del sensor (empalme de alta presión) y se encuentra con la membrana metálica donde está dispuesto el sensor. La presión medida por el sensor se transforma en una señal eléctrica amplificada que se traslada a la ECU mediante las conexiones eléctricas. [1]

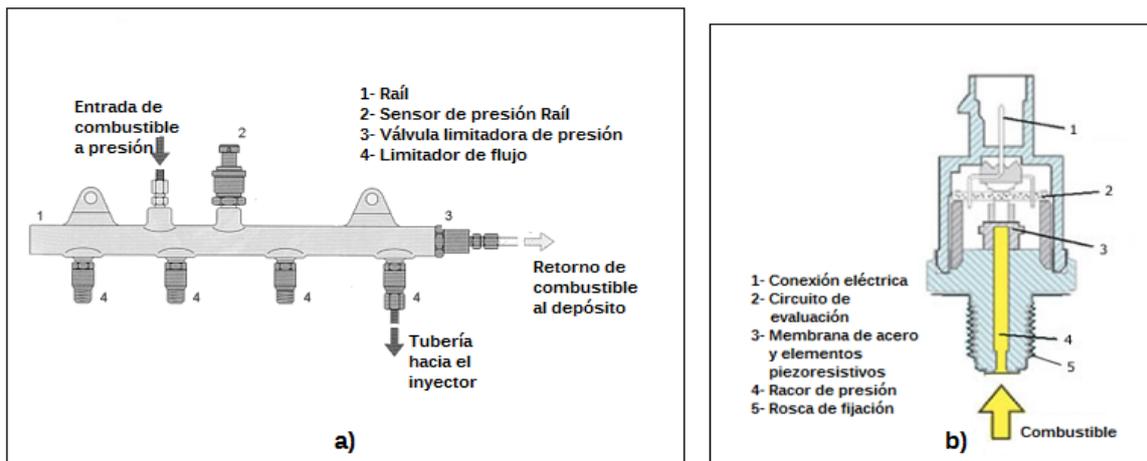


Figura 3. 8: a) Raíl. b) Esquema del sensor de alta presión del raíl. [25]

También dispone de una válvula limitadora de presión colocada enroscada al final del raíl y que tiene el mismo principio que una válvula de sobrepresión. Su funcionamiento es mecánico y está formada por un tabique de alta presión, un conducto para el retorno de combustible, un muelle y un pistón móvil. Cuando el combustible encerrado en el raíl se encuentra a una presión inferior a la máxima, el muelle mantiene el émbolo presionado sobre la pared de forma estanca. En el momento en el que se supera esa presión máxima el émbolo vence la fuerza del muelle y el combustible presurizado atraviesa la válvula retornando de nuevo al depósito. [9]

- **Inyectores.** Son los encargados de la inyección, la atomización y mezcla del Diesel en el interior de la cámara de combustión del cilindro.

Los inyectores se abren o cierran controlados eléctricamente mediante la ECU de modo que el sistema es mucho más fiable, seguro y simple. Dependiendo del diseño de la cámara de combustión, la turbulencia del aire en el interior de ésta y el caudal de inyección, el inyector dispone de más o menos orificios con un diámetro determinado. Cuando el inyector se abre, el combustible atraviesa el inyector como consecuencia de una diferencia de presión entre el raíl y el cilindro, y se pulveriza gracias al diámetro tan pequeño de los orificios. [9]

Se suelen agrupar en función del sistema de accionamiento interno, mediante válvula piezoeléctrica o de solenoide. Siendo el primero de ellos el más avanzado tecnológicamente debido a su flexibilidad, rapidez de respuesta y estabilidad en el método de las inyecciones múltiples, empleadas para la reducción de emisiones contaminantes.

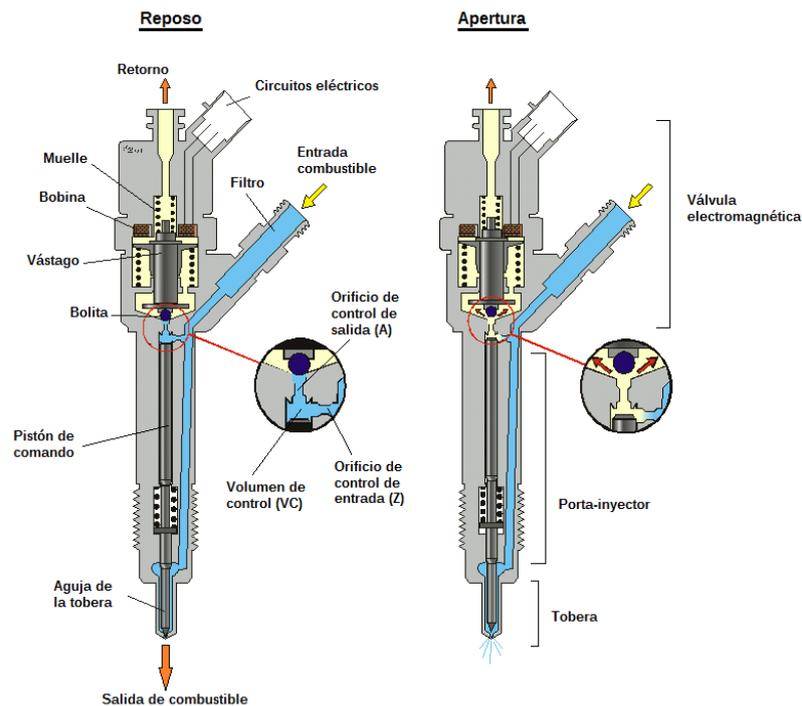


Figura 3. 9: Inyector de un sistema Common-Rail con válvula de tipo solenoide. [26]

### Inyector con válvula de tipo solenoide

En la Figura 3.9 se muestra el inyector de un sistema *Common-Rail* donde pueden apreciarse los distintos componentes que lo constituyen. Los elementos principales son el portainyector, la tobera y la válvula electromagnética.

La flecha amarilla indica la entrada de combustible, que se hace pasar a través de un filtro para posteriormente bifurcarse en dos canales. Uno de los conductos transporta el combustible presurizado a la tobera (parte baja del inyector) y el otro al volumen de control (VC) a través de un orificio de control de entrada Z (parte superior del inyector).

La válvula electromagnética se trata de una servoválvula con dos orificios (A y Z), de modo que cuando el solenoide esté desactivado el vástago estará en su posición de reposo y una pequeña esfera obstaculizará el orificio (A) de salida del VC. En este estado de reposo la inyección no se produce debido a que los orificios de la tobera están bloqueados por el conjunto pistón-aguja. Cuando se quiere inyectar combustible se excita el solenoide con un pulso eléctrico mandado desde la ECU, que produce una fuerza hacia arriba levantando el vástago y con él también la esfera, desbloqueándose el orificio de control de salida (A) del VC. Debido a la apertura del orificio de control de salida (A) se produce una fuerte pérdida de presión en el VC produciéndose una descompensación entre la presión de la parte superior del pistón de comando, y la parte baja de la aguja (que se encuentra a la misma presión del raíl) generando un desplazamiento hacia arriba del conjunto pistón-aguja desbloqueándose los orificios de la tobera.

Por último, cuando se desea dejar de inyectar, la ECU deja de mandar un pulso eléctrico a la bobina y el vástago retorna a su posición de reposo y vuelve a bloquearse el orificio de control de salida (A). El VC comienza a llenarse de nuevo de combustible presurizado procedente del raíl ya que se corta el flujo de retorno. En el momento en que la presión en el VC vuelve a ser la misma que en el raíl el conjunto pistón-aguja es empujado hacia abajo bloqueando los orificios de la tobera. Aquí debe recordarse de que fuerza es presión por superficie, por lo que, aunque la presión en la parte alta del pistón de comando es igual a la existente en la parte baja de la aguja, al ser mayor la superficie de la primera, la fuerza de presión resultante es hacia abajo. En este momento se produce el cierre del inyector finalizando así la inyección. [9]

Una vez explicado el proceso de funcionamiento de este tipo de inyectores es preciso destacar que existe un pequeño retraso desde que la ECU manda el pulso eléctrico hasta que se inicia la inyección. En el caso de los inyectores de accionamiento piezoeléctrico este retraso es notablemente inferior, motivo por el cual tienen un uso más extendido.

#### **Inyector con válvula de tipo piezoeléctrico**

Este tipo de inyector sigue el mismo principio de funcionamiento, a diferencia de que la bobina de excitación es remplazada por un conjunto de cristales de cuarzo apilados entre varias placas metálicas. Estas placas se conectan de forma alternativa a masa y a positivo de forma que cuando reciben una diferencia de tensión se dilatan haciendo que el orificio de control de salida (A) se abra, desahogando el VC.

Mientras que en el inyector de solenoide se debe excitar la bobina y generar en el vástago una fuerza inducida por un campo magnético, en el inyector piezoeléctrico se debe únicamente a la elongación de los cristales. Por otro lado, la parte móvil es reducida solamente a la aguja y se ha eliminado el pistón para lograr una mayor rapidez y precisión.

- **Tuberías de alta presión.** La presión del combustible que circula por estos conductos está por encima de los 2800 bar, por lo que el material del que están hechas debe ser rígido. Suelen ser de acero inoxidable.
- **Conductos de retorno de combustible.** Se encargan de devolver el excedente de gasoil de la bomba de AP, del raíl y de los inyectores. Esto puede apreciarse en la Figura 3.3.

Por último, queda por explicar una de las partes más importantes, no solo del sistema de inyección, sino también de todo el funcionamiento del motor.

- **Unidad de Control Electrónica.** La ECU es una especie de centralita formada por microprocesadores de gran capacidad que analizan y controlan todas las señales recibidas por los distintos sensores distribuidos por el motor, comparándolas con los datos internos que han sido programados por el fabricante o el usuario.

Su papel sobre el sistema de inyección consiste en controlar el momento exacto en el que se va a comenzar a inyectar, la duración y cantidad de combustible, salto de la chispa (en MEP), control de las válvulas para optimizar el flujo de aire introducido en el cilindro, etc.

También sirve para alertar al usuario en caso de fallo de alguno de los actuadores o informar del nivel de combustible o las revoluciones a las que llevas el motor. Entre sus numerosas ventajas destaca el hecho de que al controlar mejor la inyección se puede conseguir un consumo de combustible más óptimo y, por lo tanto, reducir las emisiones contaminantes.

### **Sistema inyector bomba**

Como alternativa al *Common-Rail* existe el sistema de inyector bomba, que, aunque posee también un sistema de gestión electrónica dispone de un principio de funcionamiento bastante distinto al anterior.

Mientras que en el sistema *Common-Rail* solo era necesaria una única bomba que proporcionase combustible presurizado a todos los inyectores, con el sistema inyector bomba cada inyector dispone de una bomba individual, además de una válvula electromagnética, formando una unidad compacta localizada en la culata del motor, aumentando su complejidad.

El accionamiento de este tipo de inyector consiste en un balancín con rodillo que es accionado, por una parte, mediante la ECU de forma electrónica, y, por otra parte, mecánicamente por una leva que forma parte del árbol de levas, por lo que la presión y la cantidad de combustible inyectado dependerá del régimen de giro. Una de las ventajas del inyector-bomba frente al *Common-Rail* es que se obtienen presiones máximas más elevadas, ya que el émbolo de bombeo del inyector bomba es oprimido a gran velocidad. Aunque esa presión depende del régimen de giro al ser accionado por el movimiento del árbol de levas, lo que supone una desventaja. [9]

Puesto que este sistema no es objeto de este proyecto no vamos a entrar a explicar su funcionamiento.

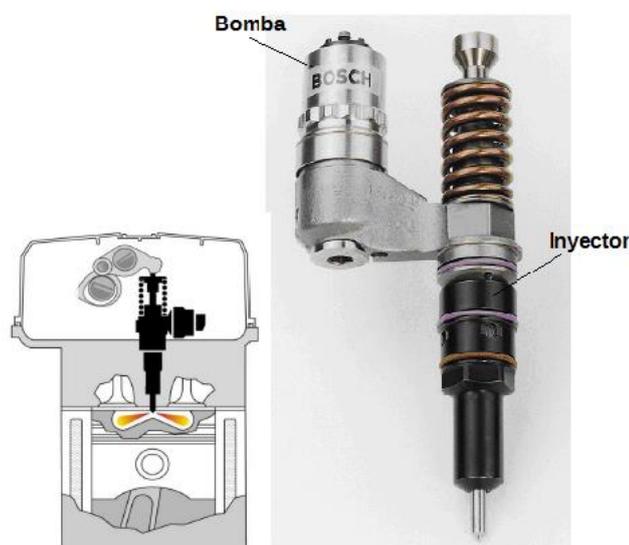


Figura 3. 10: Sistema de inyección electrónica con inyector-bomba. [27]

### 3.3.2.2 Proceso de combustión

Estrategias como aumentar la presión de inyección o inyectar alrededor del punto muerto superior (PMS) ayudan a acelerar el proceso de formación de la mezcla aire-combustible y con ello el proceso de combustión. Con esto se consigue favorecer a que la combustión sea completa y reducir las emisiones de partículas contaminantes.

Para estudiar el proceso de combustión en MEC se realiza un diagnóstico experimental que consiste en medir la presión en el interior del cilindro para obtener la cantidad de calor que se ha liberado. Se mide también el caudal másico de combustible que ha sido inyectado por unidad de tiempo (tasa) y se comparan los tres parámetros, tal y como se muestra en la Figura 3.11.

La curva más importante es la de liberación de calor (DFQL) en la que se distinguen tres fases:

- *Fase I, retraso del autoencendido.* Desde que se inicia la inyección hasta que se produce la liberación de calor transcurre un pequeño periodo de tiempo donde el combustible es inyectado, mezclado y evaporado. En esta fase se producen fenómenos físicos y químicos.
- *Fase II, combustión premezclada.* El Diesel sigue inyectándose y la mezcla aire-combustible que está en el interior del cilindro empieza a quemarse liberando calor de forma intensa. En esta fase la presión aumenta hasta alcanzar su valor máximo, produciendo ruido.
- *Fase III, combustión por difusión.* Es la fase más larga. Mientras sigue inyectándose combustible el calor liberado aumenta hasta alcanzar su segundo máximo. Y en el momento en el que se corta la inyección la cantidad de calor liberado disminuye y se termina de quemar la mezcla aire-combustible que queda en el cilindro (en algunos casos, si la presión disminuye demasiado, se corta la combustión y queda combustible por quemar).

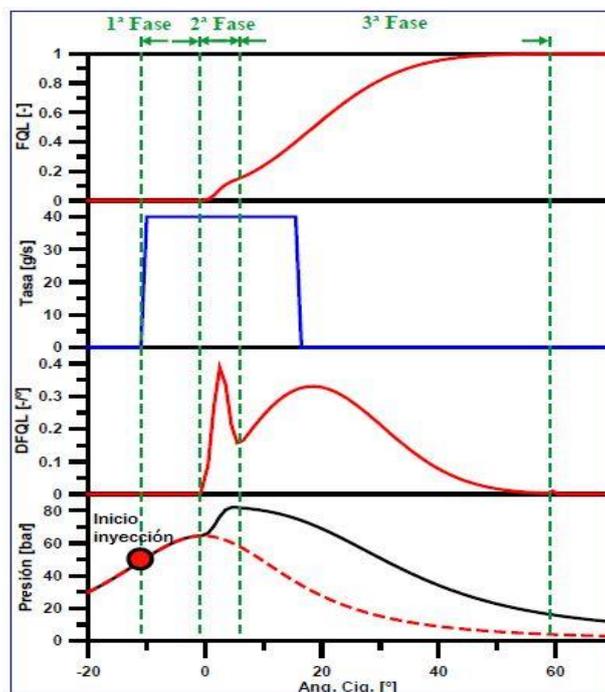


Figura 3. 11: Fases del proceso de combustión de un MEC. [28]

## Capítulo 4

### INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Debido a la duración para llevar a cabo este proyecto, alguno de los elementos que se ha diseñado no ha sido posible incluirlos en el montaje, pero sí se han calculado (como el caso del depósito de AP) o construido (como el depósito de BP). Por lo tanto, quedará como proyectos futuros terminar de desarrollar por completo la instalación experimental.

A continuación, se van a explicar todos los elementos que componen el diseño. Se entrará más en detalle en los elementos que componen la zona de baja presión, aunque también se explicarán los elementos que componen la zona de alta presión y el circuito neumático de aire.

#### 4.1 Introducción

El diseño de la instalación experimental se ha llevado a cabo siguiendo el modelo teórico del sistema *Common-Rail*. Se colocará la bomba neumática en el centro de la estructura de acero y se añadirá el resto de los elementos entorno a esta. El depósito de baja presión, donde se encuentra almacenado el combustible, se colocará de forma independiente fuera de la estructura, pero próximo a la bomba de BP.

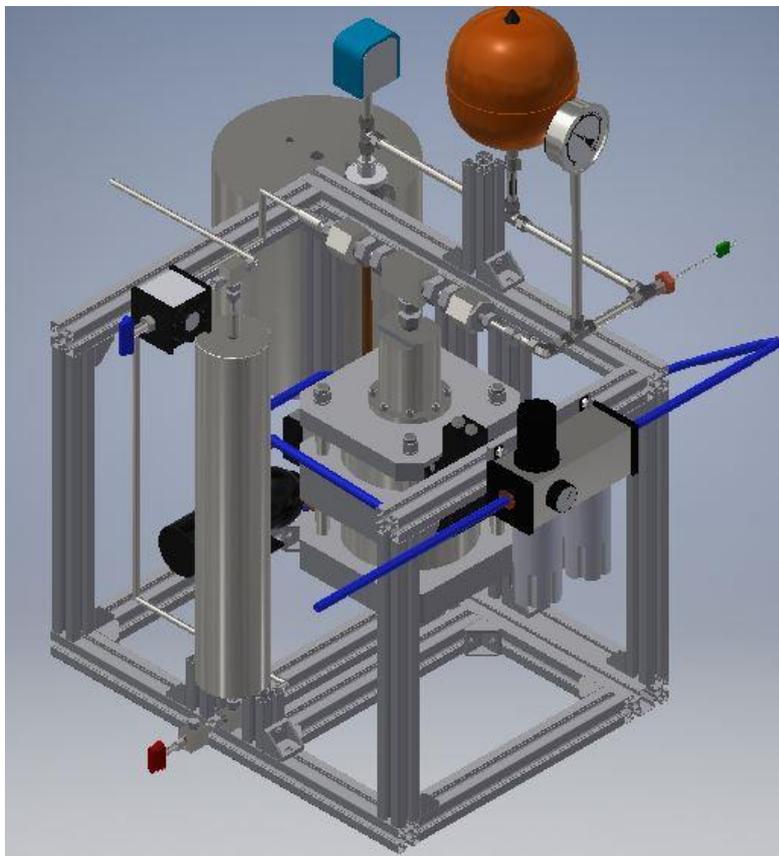


Figura 4. 1: Diseño de la maqueta que se va a construir (vista frontal).

La bomba de BP se colocará al lado de la bomba neumática y cerca del presostato. Como puede apreciarse en las Figuras 4.1 y 4.2, la bomba de BP estará conectada con el presostato (colocado en la parte exterior de la estructura) mediante un tubo flexible de 12 mm de diámetro. Entre ambos elementos se va a colocar un filtro de combustible, para no dañar el mecanismo del presostato. Mediante un tubo rígido de acero, el combustible circulará hasta un racor, en cuya salida hembra se encontrará el vaso expensor. En la salida macho se conectará otro tubo rígido de acero hasta otro racor. En una de sus salidas macho se colocará un termopar para controlar la temperatura del combustible a la entrada de la bomba neumática, y en la otra salida macho se conectará otro tubo rígido hasta otro racor. En la salida hembra de este último racor se conectará, mediante un tubo rígido de acero, un manómetro y a la salida macho un tubo rígido que se conectará con la válvula antirretorno de entrada de la bomba neumática. Mediante un tubo rígido de mayor diámetro y sujeto a los perfiles de la estructura, se conectará la válvula antirretorno de salida de la bomba neumática con la parte baja del depósito de AP. Justo a la entrada de este depósito se colocará una válvula de seguridad, para poder despresurizar el combustible de forma rápida en caso de necesidad. Por último, a la salida del depósito se colocará un racor, en cuya una de sus salidas se colocará una válvula *MicroMetering*, que más adelante se explicará su función, y en la otra de sus salidas se colocará una manguera de poliuretano de 12 mm de diámetro que se conectará directamente con el raíl donde se encuentran los inyectores listos para ser ensayados en la *IAPAT*.

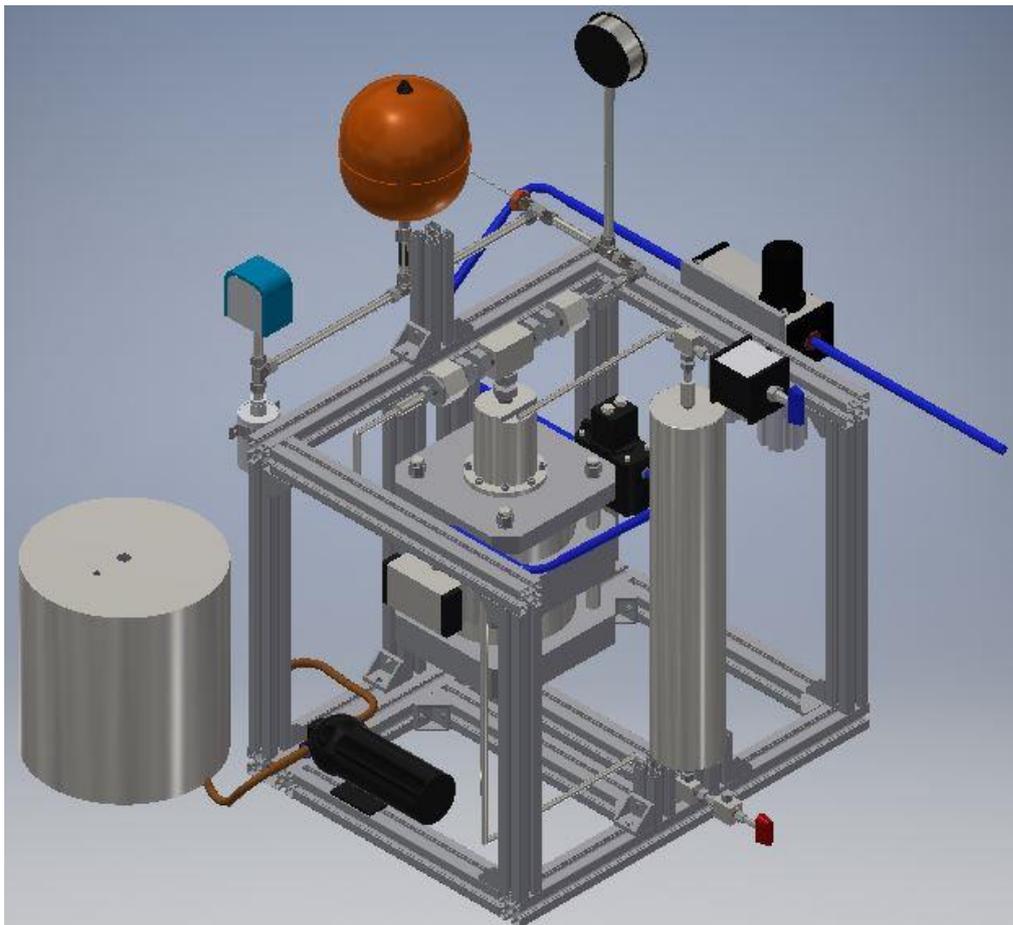


Figura 4. 2: Diseño de la maqueta experimental que se va a construir (vista lateral).

En cuanto al sistema de aire comprimido, se ha representado mediante unos conductos azules, que se tratarán de mangueras de poliuretano de 12 mm de diámetro. Mediante una de estas mangueras se conectará la red de suministro de aire comprimido del laboratorio con la válvula manorreguladora (colocada en el perfil derecho de la estructura), de esta se conectará a la electroválvula (colocada en un soporte pegado a la bomba neumática), y de esta a la bomba neumática.

A continuación, se va a explicar cada uno de los elementos siguiendo el orden del flujo del fluido combustible, empezando desde que es extraído del depósito hasta que se envía a los inyectores.

## 4.2 Elementos de la zona de baja presión

### 4.2.1 Depósito de combustible de baja presión

Se trata de un volumen de almacenamiento de Diesel a presión atmosférica. Inicialmente, la maqueta usaba como depósito la propia garrafa de 10L donde venía el combustible que compraba el CMT (Figura 4.3). Esto supone varios inconvenientes:

Durante los ensayos de tasa el combustible se recircula continuamente, de modo que, si el sistema de refrigeración empleado en estos ensayos fallase, el combustible iría aumentando de temperatura. Aunque el plástico de la garrafa es bastante resistente, podría llegar a deformarse.

Por otro lado, todos los conductos de entrada y salida del combustible deben colocarse en el único orificio de la garrafa, en el tapón. De modo que estas conexiones quedan completamente desordenadas. Además, deben ser de plástico, ya que al no estar sujetas a ninguna estructura deben ser muy flexibles. Otro inconveniente es la dificultad de transportarla cuando la maqueta pasa de un laboratorio a otro.

Para solucionar este problema, se ha diseñado un depósito de acero que disponga de varios orificios para alojar los distintos conductos. A continuación, se muestra su diseño y los cálculos realizados.



Figura 4. 3: Depósito de combustible original de la maqueta.

#### 4.2.1.1 Diseño del nuevo depósito

Se buscaba obtener un depósito de construcción sencilla y de una capacidad aproximada de 20L. En uno de los talleres de las instalaciones del CMT había un tubo largo metálico de 300 milímetros de diámetro exterior y un espesor de 2 milímetros, así que se ha aprovechado para hacer la pared cilíndrica del depósito. Las tapas inferior y superior se han diseñado con los mismos diámetros para que el tornero las soldara a la pared y se han mandado los planos a una empresa para mecanizar ambas piezas.

Además, se ha fabricado un control de nivel para incluirlo en la pared del depósito de modo que se pueda saber en todo momento el nivel de combustible disponible. Para ello, se han realizado dos agujeros, uno encima de otro, separados unos 15 cm, de aproximadamente 10 mm en la pared cilíndrica y se han soldado dos manguitos de 3/8". Ambas conexiones se han unido mediante un tubo de silicona transparente de 10 mm de diámetro y se le han realizado varias marcas para controlar el volumen de combustible.

Ahora, los conductos se encuentran en la tapa inferior, de modo que la salida del combustible se produce por la parte baja del depósito. De esta forma la bomba de BP necesita realizar un trabajo menor para impulsar el combustible y siempre está cebada. Además, se ha añadido un desagüe para evacuar el combustible (tarea que antes costaba de realizar). En la tapa superior se ha incluido un agujero para la expulsión de gases, ya que el gasoil contiene elementos volátiles, y otro agujero para los retornos de combustible.

Finalmente, para mantener el Diesel a una temperatura constante y controlada se ha diseñado un intercambiador de calor de tubo que irá colocado en el interior del depósito.

#### • Cálculos

Datos de partida del depósito:

- Volumen deseado	→	aproximadamente 20 litros.
- Diámetro exterior de la pared	→	300 milímetros.
- Espesor de la pared cilíndrica	→	2 milímetros.
- Diámetro interior de la pared	→	$300 - 2 \cdot 2 = 296$ milímetros.
- Altura de la pared	→	320 milímetros.

Datos de intercambiador:

Puesto que el depósito es cilíndrico, la mejor estructura del intercambiador es de tipo espiral. Para conseguir una mayor superficie de contacto con el combustible se ha diseñado con un diámetro de la espiral próxima a la del depósito y un diámetro de tubo ancho.

Hemos de calcular el volumen que ocupará ya que será espacio que quite al combustible.

- Distancia hasta la pared	→	12 milímetros.
- Diámetro exterior	→	$296 - 12 \cdot 2 = 272$ milímetros.
- Diámetro exterior del tubo	→	12 milímetros.
- Espesor del tubo	→	1 milímetro.

Entre cada vuelta del intercambiador se ha dejado un espacio de 8 milímetros (20 milímetros entre centros), por lo tanto, para una altura de 320 milímetros se pueden conseguir 14,5 vueltas, que supone una altura de 311 milímetros. Todos estos datos aparecen recogidos en la tercera página del documento IV.

#### Cálculos para una vuelta de tubo:

- $A_{\text{transv.-tubo}} = \pi \cdot (d_{\text{tubo}}/2)^2 = \pi \cdot (0,012/2)^2 = 0,0001131\text{m}^2$
- $\text{Perímetro} = \pi \cdot D_{\text{central}} = \pi \cdot 0,260 = 0,8168\text{ m}$
- $\text{Volumen} = \text{Perímetro} \cdot A_{\text{transv.-tubo}} = 0,8161 \cdot 0,0001131 = 0,0923795\text{ litros}$
- $\text{Longitud tubo} \approx \text{Perímetro} = 0,8168\text{m}$

#### Cálculos para las 14,5 vueltas de tubo:

- $\text{Volumen total vueltas} = 0,0923795 \cdot 14,5 = 1,3395\text{litros}$
- $\text{Longitud total vuelta} = 0,8168 \cdot 14,5 = 11,8436\text{m}$

Además, hemos de añadir los tramos rectos:

- $\text{Tramo corto} = 15\text{ mm}$
- $\text{Tramo largo} = 311\text{mm}$
- $\text{Volumen} = \pi \cdot (d_{\text{tubo}}/2)^2 \cdot (15 + 311) = 0,003687\text{ litros}$

Finalmente, obtenemos una longitud de tubo de 12,1695 metros, que ocupa 1,3763 litros.

Por lo tanto, obtenemos:

- |                                      |   |                            |
|--------------------------------------|---|----------------------------|
| - Volumen del depósito               | → | 22 litros.                 |
| - Volumen ocupado por intercambiador | → | 1,3763 litros.             |
| - Capacidad real del depósito        | → | 20,64 litros.              |
| - Intercambiador de tubo             | → | aproximadamente 12 metros. |

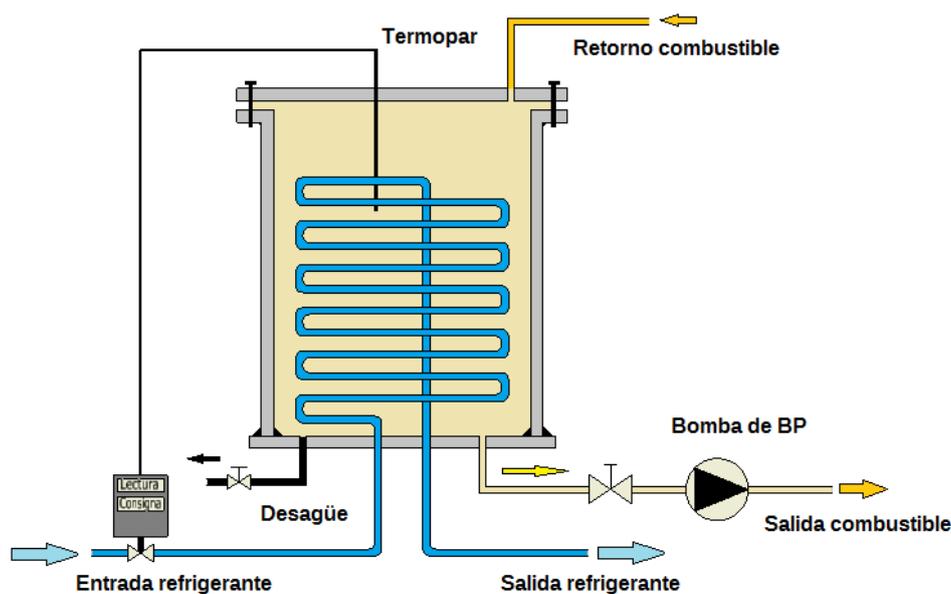


Figura 4. 4: Esquema del nuevo depósito de combustible.

## RESULTADOS DEL DISEÑO TÉRMICO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR DE TUBO CONSTRUIDO

Una vez hemos obtenido las dimensiones del tubo, se va a llevar a cabo un estudio de la transferencia de calor de este elemento. Para ello se van a emplear los principios fundamentales de la mecánica de fluidos y de la termodinámica. [29]

Existen varios métodos para el estudio térmico de un intercambiador, como son la *Metodología de la DMTL* y la *Metodología de la Efectividad*.

### Ecuaciones básicas:

- **Balance de energía de un intercambiador:**

$$Q = m_c(h_{ce} - h_{cs}) = m_f(h_{fs} - h_{fe}) \quad (4.1)$$

Si se aproxima  $\Delta h = C_p \Delta T$ , se obtiene la expresión:

$$Q = m_c C_{pc}(T_{ce} - T_{cs}) = m_f C_{pf}(T_{fe} - T_{fs}) \quad (4.2)$$

Siendo:

Q : Flujo térmico que se ha transferido (W)

$m_c$  : Gasto másico del fluido caliente (Kg/s)

$C_{pc}$  : Calor específico del fluido caliente (KJ/KgK)

$T_{ce}$  : Temperatura de entrada del fluido caliente (K)

$T_{cs}$  : Temperatura de salida del fluido caliente (K)

$m_f$  : Gasto másico del fluido frío (Kg/s)

$C_{pf}$  : Calor específico del fluido frío (KJ/KgK)

$T_{fe}$  : Temperatura de entrada del fluido frío (K)

$T_{fs}$  : Temperatura de salida del fluido frío (K)

- **Flujo térmico transferido de un fluido a otro a través de una superficie:**

$$Q = AU \cdot \Delta T_m \quad (4.3)$$

Siendo:

A : Área de transferencia de calor ( $m^2$ )

U: Coeficiente global de transmisión de calor ( $W/m^2K$ )

$\Delta T_m$  : Diferencia de temperatura media logarítmica (K)

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_c - \Delta T_f}{\ln \Delta T_c / \Delta T_f} \quad (4.4)$$

- **Coefficiente global de transmisión de calor (U):**

Este valor tiene en cuenta la conductividad térmica del material de la superficie, los distintos mecanismos de convección que existen a ambos lados de la pared del intercambiador y las condiciones de limpieza y mantenimiento. Cuya expresión es la siguiente:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\eta_c h_c} + Re_c + \frac{e \cdot A_c}{k \cdot A_m} + \left( Re_f + \frac{1}{\eta_f h_f} \right) \frac{A_c}{A_f}} \quad (4.5)$$

Siendo:

$\eta_c$  : eficiencia de las aletas, en caso de haberlas, en el lado caliente

$h_c$  : Coeficiente de convección donde el circula el fluido caliente (W/m<sup>2</sup>K)

$Re_c$  : resistencia al ensuciamiento donde circula el fluido caliente (m<sup>2</sup>·K/W)

$e$  : espesor de la pared

$k$  : coeficiente de conducción térmica de la pared (W/mK)

$A_c$  : Área de transferencia de calor donde circula el fluido caliente (m<sup>2</sup>)

$A_m$  : Área de transferencia de calor media (m<sup>2</sup>)

Lo mismo para los términos con subíndice  $f$ , que hace referencia al fluido frío.

Por lo tanto, disponemos de un tubo de 12,1695 m de longitud, 6 mm de diámetro exterior y un espesor de 1 mm. Está fabricado de acero inoxidable. Con este intercambiador se consigue reducir la temperatura de 0,021 Kg/s de Diesel desde los 80 °C hasta los 40 °C, empleando 0,05 Kg/s de agua a 30°C. El flujo en su interior es a contracorriente.

Con estos datos, puede calcularse el coeficiente global de transmisión de calor del intercambiador. Para ello, vamos a emplear la *Metodología de la Efectividad (NUT)*.

La eficiencia del intercambiador se define como:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (4.6)$$

Siendo:

$Q$  : Flujo térmico real que se ha transferido (W)

$Q_{max}$  : Flujo máximo que podría ser transferido (W)

$$Q_{max} = (T_{ce} - T_{fe}) \cdot (mC_p)_{minimo} \quad (4.7)$$

La relación de capacidades entre los fluidos caliente y frío se define como:

$$C_r = \frac{(mC_p)_{minimo}}{(mC_p)_{maximo}} \quad (4.8)$$

Finalmente, el número de unidades de transferencia de calor se expresa como:

$$NTU = \frac{UA}{(mC_p)_{minimo}} \quad (4.9)$$

Existe una relación entre eficiencia y el NTU distinta para cada tipo de intercambiador. En este caso, como se trata de un intercambiador de contracorriente, despejando se tiene:

$$Q = m_c C_{pc} (T_{ce} - T_{cs}) = UA \cdot \frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{\ln \frac{(T_{ce} - T_{fs})}{(T_{cs} - T_{fe})}} \rightarrow \ln \frac{(T_{ce} - T_{fs})}{(T_{cs} - T_{fe})} = \frac{UA}{m_c C_{pc}} \cdot \frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{(T_{ce} - T_{cs})} \rightarrow$$

$$\frac{1}{(1 - C_r)} \cdot \ln \frac{1 - \varepsilon \cdot C_r}{1 - \varepsilon} = NTU \rightarrow \varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU \cdot (1 - C_r)}}{1 - C_r \cdot e^{-NTU \cdot (1 - C_r)}} \quad (4.10)$$

#### Asignación de datos:

En este caso, el fluido caliente es el combustible y el fluido frío el agua.

$q_c$  : 1,5 l/min ;  $\rho_c$  : 832 Kg/m<sup>3</sup> ;  $\dot{m}_c$  : 0,021 Kg/s ;  $C_{pc}$  : 2,22 KJ/KgK ;  $T_{ce}$  : (80+273) K ;

$T_{cs}$  : (40+273)K ;

$\dot{m}_f$  : 0,05 Kg/s ;  $C_{pf}$  : 4,18 KJ/KgK ;  $T_{fe}$  : (30+273) K ;  $T_{fs}$  : (?+273) K ;

#### Solución:

- Calor transferido:

$$Q = m_c C_{pc} (T_{ce} - T_{cs}) = 0,021 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \cdot 2,220 \frac{\text{KJ}}{\text{KgK}} \cdot (80 - 40)K = 1,865 \text{ KW} \quad (4.2)$$

- Temperatura de salida del agua:

$$T_{fs} = \frac{Q}{\dot{m}_f \cdot C_{pf}} + T_{fe} = \frac{1,865 \frac{\text{KJ}}{\text{s}}}{0,05 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \cdot 4,18 \frac{\text{KJ}}{\text{KgK}}} + (30 + 273) = (38,92 + 273)K \quad (4.2)$$

- Eficiencia:

$$Q_{max} = (T_{ce} - T_{fe}) \cdot (mC_p)_{minimo} = (T_{ce} - T_{fe}) \cdot (mC_p)_{caliente} = 0,021 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \cdot 2,22 \frac{\text{KJ}}{\text{KgK}} \cdot (80 - 30)K = 2,331 \text{ KW} \quad (4.7)$$

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{1,865 \text{ KW}}{2,331 \text{ KW}} = 0,80 \quad (4.6)$$

- NTU:

$$C_r = \frac{(mC_p)_{minimo}}{(mC_p)_{maximo}} = \frac{0,021 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \cdot 2,22 \frac{\text{KJ}}{\text{KgK}}}{0,05 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \cdot 4,18 \frac{\text{KJ}}{\text{KgK}}} = 0,223 \quad (4.8)$$

$$NTU = \frac{1}{(1 - C_r)} \cdot \ln \frac{1 - \varepsilon \cdot C_r}{1 - \varepsilon} = \frac{1}{(1 - 0,223)} \cdot \ln \frac{1 - 0,80 \cdot 0,223}{(1 - 0,80)} = 1,818 \quad (4.10)$$

- Área de transferencia de calor:

El serpentín se trata de un tubo que ha sido doblado en círculos, por lo que, para calcular su superficie de una forma aproximada se puede calcular el perímetro de todos los círculos que forman parte de ese serpentín. Es decir, como si realizásemos un corte longitudinal en el tubo y lo desdobláramos, obteniendo un rectángulo:

$$A = 2\pi \cdot r_{ext} \cdot longitud = 2\pi \cdot 0,006 \cdot 12,1695 = 0,459 \text{ m}^2 \quad (4.11)$$

- Coeficiente global de transmisión de calor:

$$U = \frac{NTU \cdot (mC_p)_{\text{minimo}}}{A} = \frac{1,818 \cdot (0,021 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \cdot 2,22 \frac{\text{KJ}}{\text{KgK}})}{0,459 \text{m}^2} = 184,65 \frac{\text{W}}{\text{Km}^2} \quad (4.9)$$

Estos cálculos se han seguido teniendo en cuenta los valores medios de los ensayos de tasa, por lo que, variarán dependiendo del tipo de ensayo y de las condiciones con las que se ensaye.

En la Figura 4.4 se ha representado el esquema del nuevo depósito. Las tuberías azules representan los conductos por donde circulará el refrigerante (agua). Esta agua proviene del sistema de abastecimiento del CMT, por lo que la conexión de este conducto se realizará directamente sobre las cañerías que pasan por el laboratorio. En la entrada se va a colocar una electroválvula que regulará la cantidad de agua que es introducida en función de la temperatura a la que se encuentre el combustible. Como ya se ha comentado, la salida del combustible se producirá por abajo, mientras que los retornos de combustible procedentes de los inyectores se introducirán por arriba. En la Figura 4.5 se muestra una imagen real del interior del depósito construido, donde puede verse el intercambiador.

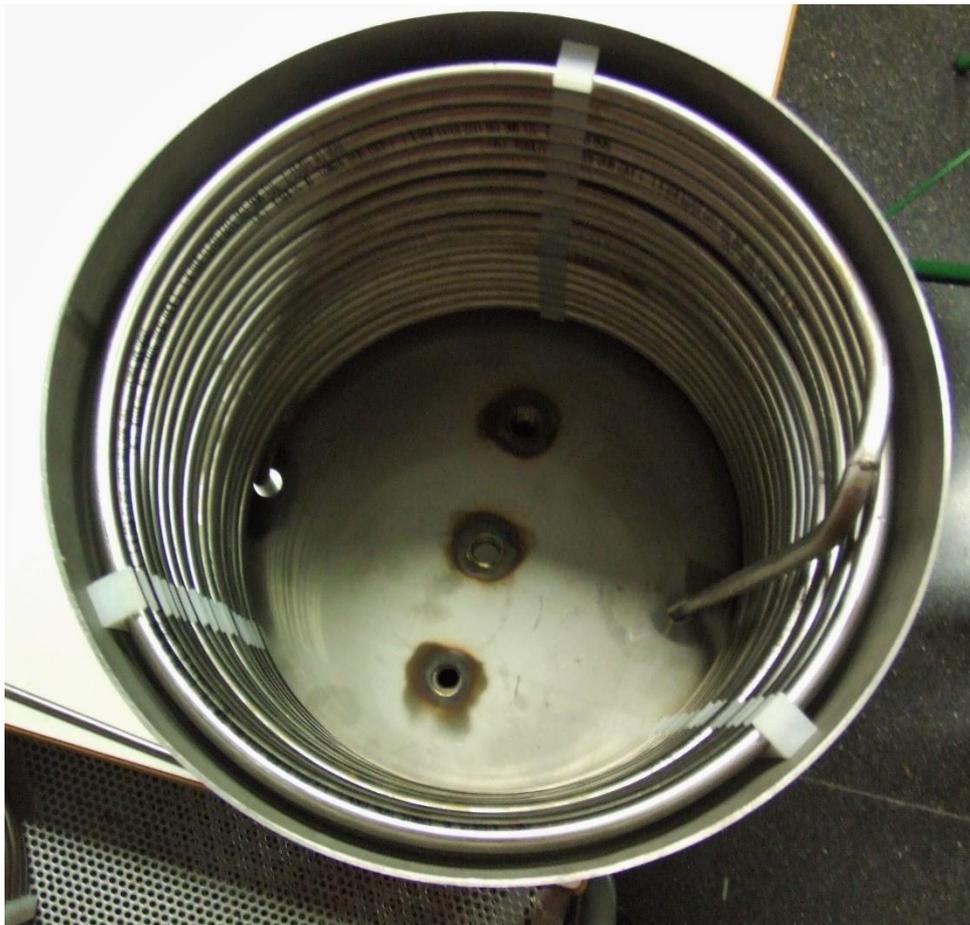


Figura 4. 5: Imagen del depósito de acero construido.

En el documento IV se encuentran los planos de las tapas mecanizadas del depósito y del intercambiador. A continuación, se va a explicar los agujeros y conectores utilizados en ambas tapas:

#### **Tapa superior:**

Se ha realizado un agujero para la expulsión de gases, de 12 mm de diámetro. Situado en el centro de la tapa, se ha realizado otro agujero de 21 mm de diámetro para los conductos de retorno del combustible. A este agujero se le ha soldado un manguito de 3/8".

Esta tapa no se encuentra soldada, ya que el llenado del depósito se realizará retirándola. Por lo tanto, se emplearán cierres industriales para su sujeción a la pared.

#### **Tapa inferior:**

Esta tapa sí se ha soldado a la pared y se le han realizado 5 agujeros. Como puede verse en el plano, los agujeros 1 y 2 son de 16,3 mm y son para el tubo del intercambiador de calor. Los conectores que se van a emplear son un pasatabiques CBU-10M y un codo CAL-10M, para poder orientar el conducto hacia la dirección que se desee. Los agujeros 3 y 4 son de 21 mm y son para el desagüe y la salida del Diesel hacia la bomba, respectivamente. En ambos se va a emplear un manguito de 3/8" y un racor CSLA 10M-6G. Y, por último, el agujero 5 es de 17 mm y es para el termopar. Se ha utilizado un manguito de 1/4" y un racor de 1/4".

En el diseño de la Figura 4.4, el termopar se introduce por la tapa superior, sin embargo, en el último momento se decidió que la alternativa de introducirlo por la tapa inferior era más adecuada.

Para finalizar con el diseño del depósito, se han soldado 3 tuercas en la parte exterior de la tapa inferior para poder colocar 3 ruedas pequeñas antideslizantes y facilitar así su desplazamiento entre laboratorios, ya que es independiente de la estructura donde van montados el resto de los elementos.

Todas estas operaciones pueden verse en la siguiente foto, Figura 4.6:



*Figura 4. 6: Parte inferior del depósito de BP.*

Este elemento ha sido el más costoso de construir ya que el mecanizado y soldado de las piezas ha sido realizado por varias empresas, lo que ha supuesto bastante tiempo. Por otro lado, los distintos racores empleados para las distintas conexiones llegaron con tiempo de retraso, por lo que no se ha podido llegar a conectar la red de suministro del laboratorio con este depósito.

#### 4.2.2 Bomba de baja presión

El elemento más importante de esta instalación, después de la bomba de AP, es la bomba de baja presión, encargada de transportar el combustible Diesel del depósito a la bomba neumática de AP.

La bomba inicial que estaba instalada en la maqueta era una bomba volumétrica rotatoria de engranajes dentados adquirida a la empresa *Pierburg*, la cual trabajaba a una presión constante de 4 bar.

Inicialmente, estaba controlada por un PWM (Pulse-Width Modulation/Señal Modulada por Ancho de Pulso) para ajustar las revoluciones de giro de los engranajes y con ello la presión del combustible entregado. Pero, por causas desconocidas, no funcionaba como se esperaba y se eliminó. De modo, que la bomba quedó funcionando a potencia máxima continuamente.

Otro de los problemas que presentaba esta bomba, es que no entregaba suficiente caudal. Por esta razón, se encontraba sumergida en el depósito.

Para solucionar estos problemas, se compró la *BOMBA PRESION FLOJET TRIPLEX STO/VITON 5.5 L/min 24V (10,5 BAR) 3/8"NPT* a la empresa *Técnica de Fluidos*.

Se trata de una electrobomba, cuyas características son las siguientes:

- Construida a partir de materiales adecuados para manejar una amplia gama de productos químicos.
- Interruptor de presión sellado (Sealed pressure switch and motor).
- La bomba puede estar situada por encima del tanque de suministro hasta 8 pies (2,4 metros).
- Puede permanecer sin fluido durante periodos prolongados de tiempo sin presentar daños.
- Velocidades de flujo máxima de 1,4 GPM (5,5 LPM) y presión de funcionamiento máxima a 150 psi (10 bar).
- Motor accionado por 3 cámaras de diafragma.
- Tamaño puerto de entrada (salida: 3/8" (9,52 mm) NPFT).
- Voltaje: 24VCC, 230 CVA
- Frecuencia: 50/60 Hz.
- Amperímetros: 9 amperios máximo para 12 VDC, 0,95 amperios máximo para 115 VAC.
- Cabeza de la bomba: Nylon lleno de vidrio.
- Elastómeros de los diafragmas: Santoprene™
- Válvula antirretorno: EPDM o Viton
- Rango temperatura del líquido: 40 °F (4 °C) min, 140 °F (60 °C) máx.
- Ciclo de trabajo: intermitente.
- Peso: 7.6 lb (3,5 kg).

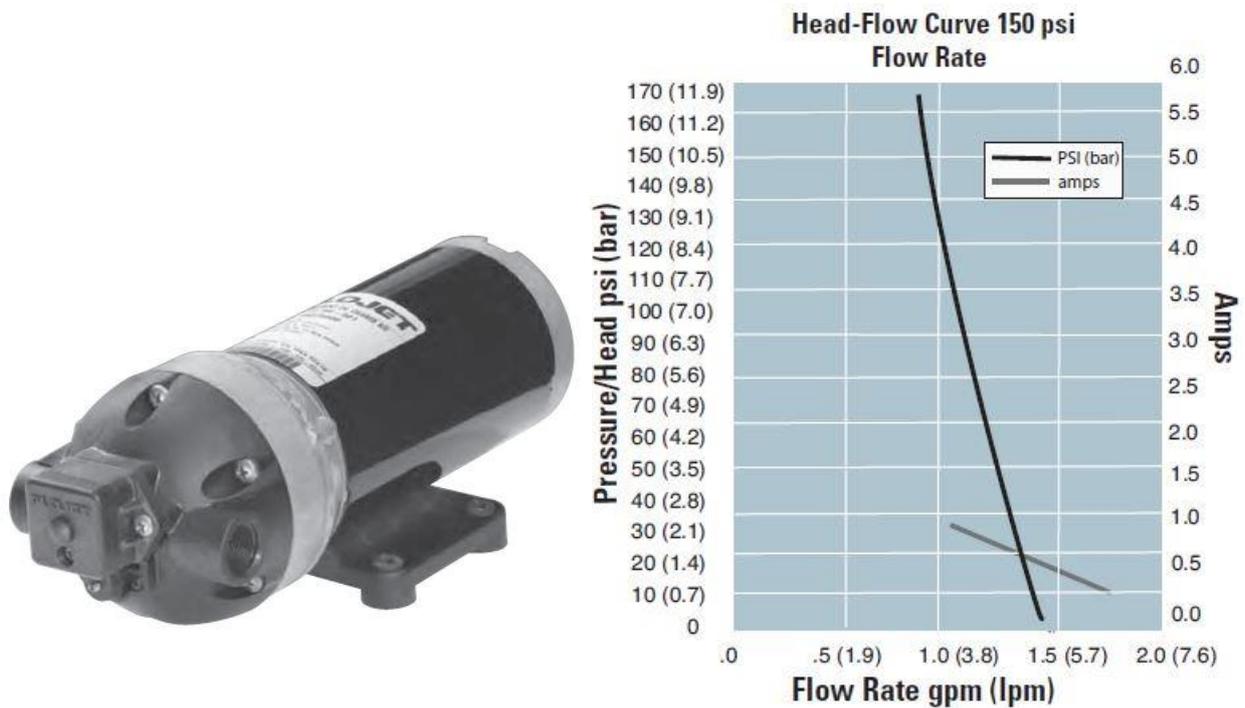


Figura 4. 7: a) Imagen de la bomba de BP de la marca FLOJET. b) Curva de flujo para 150 psi. [30]

La mayor ventaja de esta bomba frente a la que estaba instalada originalmente es que puede controlarse electrónicamente. Puesto que la presión que se alcanza durante los ensayos es muy elevada, supone un menor riesgo para los operarios ya que puede controlarse desde fuera de la sala a través de un ordenador. Además, como va a estar controlada por el presostato (más adelante se entra en detalle) no funcionará de forma continua.

Puesto que los perfiles de la estructura son mucho más estrechos que el ancho de la bomba se ha diseñado un soporte especial para alojarla. En el documento IV se muestra el plano de este soporte, el cual está fabricado de acero inoxidable 304 y se le han realizado tres agujeros de 8,5 mm para atornillarla al perfil *FASTEN*. La bomba está sujeta bajo cuatro tornillos de 6,5 mm y montada sobre unos *Silent-Blocks*. Estos elementos están fabricados de un material flexible, como el caucho, con el objetivo de absorber las vibraciones que producen los elementos mecánicos de la bomba, eliminando también posibles ruidos.

También se pidieron a la empresa *FLOJET* las conexiones necesarias para la entrada y la salida del combustible de la bomba.

### 4.2.3 Filtro de combustible Diesel

Se va a colocar un filtro de combustible del modelo KL 182 de la marca *MAHLE ORIGINAL*, que se muestra en la Figura 4.8. Colocado justo a la salida de la bomba de BP.

La bomba de BP no necesita filtro ya que al estar el gasoil a baja presión no daña significativamente los elementos mecánicos de la bomba.

Este elemento es de vital importancia para que el motor funcione correctamente, ya que evita que las impurezas sólidas del combustible penetren en el sistema de inyección y dañen los elementos del sistema. Además, El filtro KL 182 tiene un separador de agua, para decantar la humedad que expulsa el combustible. El método de separación es distinto según los fabricantes, en este caso, el combustible está sometido a decantación. Realmente es muy difícil que exista agua en el combustible, pero es posible que este esté expuesto a algún tipo de contaminación durante su almacenamiento o transporte, o incluso debido a la condensación como consecuencia de una larga estancia en el propio depósito. [31]



Figura 4. 8: imagen del filtro Diesel KL 182.

### 4.2.4 Presostato

Este elemento va a ser el encargado de controlar la presión en la zona de baja presión de la instalación.

Inicialmente, se pensó en comprar el modelo 18D-0881300 de la marca *NORGREN*, ya que su rango de trabajo variaba entre 1 y 8 bar y solo pesaba 200 gramos. Finalmente, debido a que no era necesario que la bomba de BP trabajase a presiones tan pequeñas, se decidió comprar uno menos sofisticado. Por lo tanto, se adquirió en un primer momento el modelo DSSG-2 Reforzado de la marca *INPRO*.

El rango de presión de este presostato varía entre 3,7 y 7 bar y pesa, aproximadamente, 225 gramos. Además, dispone de un interruptor para ponerlo en marcha y de un piloto que se ilumina cuando se alcanza la presión mínima en la instalación, indicando el arranque de la bomba de BP. En la Figura 4.9, se muestra una imagen real del presostato.



*Figura 4. 9: Presostato modelo DSSG-2 de la marca INPRO. [32]*

Durante el montaje de la instalación, surgieron varios contratiempos debidos a este elemento. En primer lugar, las conexiones eléctricas del presostato no estaban bien realizadas, por lo que hubo que modificarlas. En segundo lugar, no llevaba consigo ningún manual de funcionamiento, por lo que fue necesario realizar un estudio detallado para entender su funcionamiento y ajustar el rango de presión a los valores deseados. En las Figuras 4.10 y 4.11, se muestra su instalación mecánica y eléctrica, respectivamente.

En el momento de arranque del sistema, el Diesel entra por la parte inferior y ejerce una presión sobre un actuador. El muelle del actuador está regulado por un tornillo, colocado en su parte superior, que ajusta la presión mínima o sensibilidad de disparo del actuador, de modo que cuando esté estirado, los contactos del microinterruptor están unidos. Cuando los contactos están en unidos, un relé se conecta y envía una señal eléctrica a la bomba para que se conecte.

A medida que aumenta la presión del Diesel, el actuador ejerce una presión, cada vez mayor, que es contrarrestada por el muelle. Para que tenga lugar la desconexión del sistema, es decir, para que se separen los contactos del microinterruptor, debe alcanzarse la presión de parada, que equivale a:

$$\textit{Presión de parada} = \textit{presión de arranque} + \textit{presión diferencial} \quad (4.12)$$

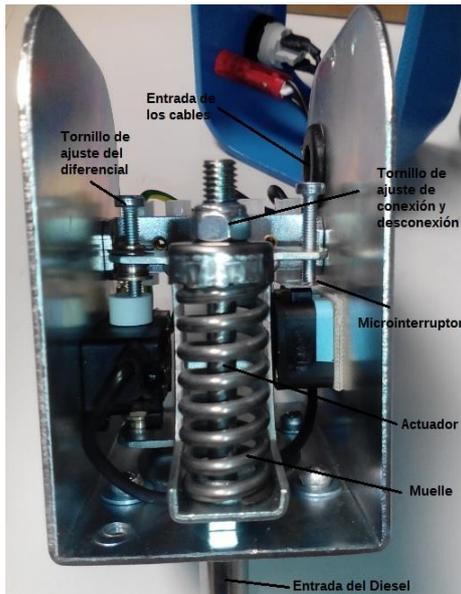


Figura 4. 10: Funcionamiento mecánico.



Figura 4. 11: Funcionamiento eléctrico.

Esta presión diferencial se puede ajustar con el tornillo que aparece a la izquierda. En el momento que se alcanza la presión de parada, la fuerza que ejerce el fluido sobre el actuador es mayor que la del muelle, por lo que este se comprime y los contactos saltan. El relé se desconecta, por lo que, deja de emitir señal eléctrica a la bomba de BP y se desconecta también.

Cuando baja la presión de la instalación, la fuerza que ejerce el Diesel sobre el actuador disminuye. Cuando la presión diferencial es nula, la fuerza del muelle vuelve a superar a la del actuador, este se descomprime y vuelve a su situación inicial, volviéndose a unir los contactos y activando de nuevo el relé. Y así, continuamente.

Una vez conectado a la instalación experimental, cuando se llevó a cabo su puesta en marcha, después de realizar varios ensayos de inyección con la maqueta el presostato empezaba a fallar. La presión mínima, después de varias conmutaciones del interruptor, no se detectaba, por lo que había que poner en marcha manualmente el presostato, pulsando el interruptor de "start". Una de las razones por las que podría deberse el fallo de funcionamiento es porque se trata de un presostato de fontanería, por lo que, al trabajar con Diesel podría haberse dañado.

Finalmente, se contactó con la empresa *Baumer* y se cambió por el presostato tipo *RP2N*, que se muestra en la Figura 4.12 y cuyas características se detallan a continuación:

- Material: acero inoxidable 304
- Diafragma del sensor de presión: acero inoxidable 17-7PH
- Precisión:  $\pm 0.5\%$  de rango ajustable.
- Alimentación: 10 amperios – 24 VCC.
- Rango temperatura:  $-65\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $-54\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) min,  $200\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $93\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) máx.
- Fluidos de trabajo: amplia gama de productos químicos.
- Peso: 2 lb. (0.9 kg).



Figura 4. 12: Presostato Baumer tipo RP2N.



Figura 4. 13: Mecanismo interno del presostato.

El mecanismo de este nuevo presostato también es de muelle-pistón, por lo que, el principio de funcionamiento es exactamente igual que es del anterior. En la siguiente imagen, Figura 4.14, se ha dibujado, a nivel representativo, su esquema mecánico para comprender mejor el funcionamiento de este nuevo presostato.

A diferencia del modelo DSSG-2, el presostato *Baumer RP2N* ya venía regulado de fábrica según el rango de presión que se había indicado desde el CMT. Que, en este caso, la presión mínima es de 4,5 bar y la presión máxima de 6 bar. Es decir, la electrobomba entrará en funcionamiento cuando la presión caiga por debajo de los 4,5 bar y se desconectará cuando llegue a los 6 bar.

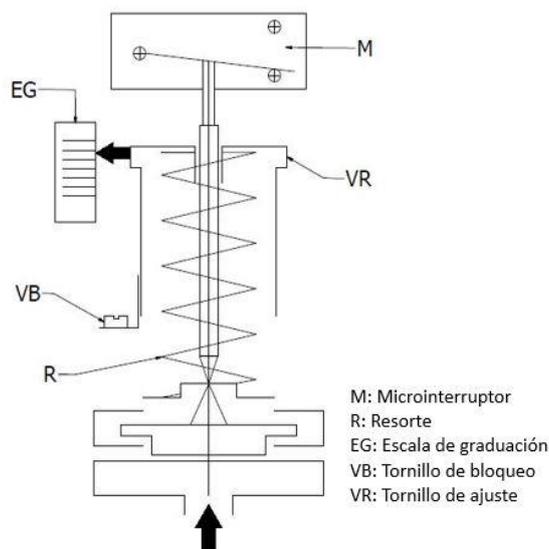


Figura 4. 14: Modelo de funcionamiento del nuevo presostato.

#### 4.2.5 Acumulador hidráulico de baja presión

Toda instalación que posea un presostato ha de poseer también un acumulador hidráulico, a fin de que abastezca el sistema cuando la bomba de BP esté parada. Para este trabajo se ha utilizado un vaso de expansión de membrana fija de 5 litros de capacidad, construidos por *Industrias IBAIONDO*. Cuyas características técnicas son las siguientes:

- Material: acero inoxidable 304.
- Membrana: caucho impermeable, flexible y elevada resistencia a temperatura.
- Protección: capa exterior de imprimación una de terminación de pintura en polvo.
- Rango temperatura: 14 °F (-10 °C) min, 212 °F (100 °C) máx.
- Presión máxima de servicio: 10 bar.
- Presión de precarga: 1,5 bar.
- Sustancias: aceite o nitrógeno.
- Capacidad: 5 lts.



*Figura 4. 15: Vaso de expansión para hidrocarburos. [33]*

Puesto que la empresa que ha fabricado este elemento no ha colocado una válvula de cierre en el conducto de paso, cada vez que se desmonte este elemento de la instalación se derramará el combustible Diesel que haya quedado en su interior y en el conducto de entrada. Por lo tanto, para evitar que esto suceda, se ha diseñado una pieza, cuyo plano aparece en la quinta página del documento IV, cuya función sea la misma que la de una válvula de paso. De esta forma, cuando se quiera vaciar el acumulador para realizar las tareas de mantenimiento oportunas no se escapará el combustible.

#### 4.2.6 Manómetro

Para controlar la presión del combustible en la entrada de la bomba neumática se va a colocar un manómetro. El objetivo de este elemento es poder verificar desde fuera y de forma rápida las condiciones con las que el Diesel circula por la zona de baja presión.



Figura 4. 16: Manómetro. [34]

En este caso, como la presión que se va a alcanzar en la zona de baja presión está entre los 4,5 y 6 bar, el manómetro empleado tiene una escala entre los 0 y 10 bar.

#### 4.3 Bomba neumática de alta presión

El objetivo principal de este TFG es diseñar un sistema de alimentación de combustible Diesel para una bomba neumática de muy alta presión. Posteriormente, esta bomba elevará la presión del fluido, para que pueda ser inyectado.

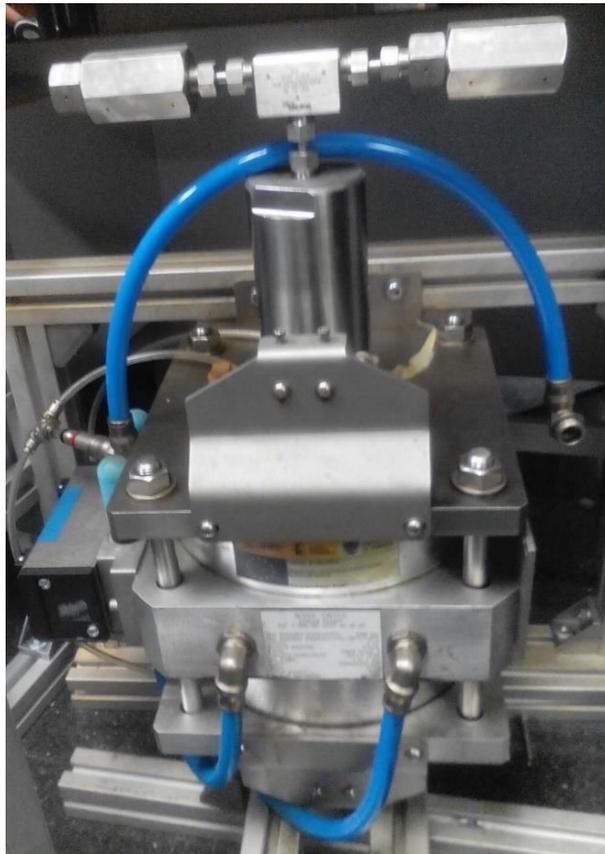
Se trata de una bomba neumática, ya que para su accionamiento se emplea aire comprimido. Pero, puesto que el fluido con el que trabaja es un líquido, también se trata de una bomba hidráulica. Se trata de la bomba de pistones *HPNP-40/4E/SE Nova Swiss* (Figura 4.15). El CMT la compró el año 2015 a la compañía *Nova Swiss Sarl*, la cual fue posteriormente modificada por la misma compañía a fin de adaptarse a las necesidades del Centro de Motores.

La bomba original era capaz de elevar la presión hasta los 7000 bar y entregaba un caudal de 2 centímetros cúbicos por pistonada. Puesto que el único uso que se le iba a dar a esta bomba era para realizar ensayos de inyección y combustión de los MCIAs, se decidió reducir la presión máxima entregada. La modificación consistió en cambiar la relación de áreas de la zona de alta presión del pistón. Puesto que fuerza es presión por superficie, para reducir la presión entregada es necesario aumentar la superficie del pistón, y con ello el volumen de control. Con esto, la nueva bomba se modificó de tal forma que elevara el fluido hasta una presión de 4000 bar y entregara un caudal de 4 centímetros cúbicos por pistonada.

Las características de la bomba una vez modificada son las siguientes:

- Sistema integrado de regulación de aire comprimido.
- Presión aire comprimido: alimentación de 1,6 bar y control de 5 bar.
- Consumo aire comprimido: 80 Nm<sup>3</sup>/h máx.
- Fluidos de trabajo: de baja viscosidad.
- Bomba de un solo pistón/cilindro.
- Válvulas antirretorno integradas.
- Presión hidráulica de entrada: min. 4 bar.
- Presión hidráulica de salida: máx. 4000 bar.
- Factor multiplicación del pistón: 1:690.
- Caudal: 4 cc por pistonada.
- Peso: 35 kg

Para elevar la presión, esta bomba neumática dispone de un ensamblaje de baja presión y otro de alta presión. El método que emplea para aumentar la presión del fluido de trabajo (en este caso, combustible Diesel) es mediante un pistón. Este pistón está confinado en un volumen, donde en la parte de baja presión hay alojado aire y en la parte de alta presión el fluido de trabajo.



*Figura 4. 17: Foto de la bomba neumática de alta presión.*

La relación de compresión de la bomba es de 1:690, esto quiere decir que la superficie del pistón en el lado del aire es 690 veces mayor que la superficie en el lado del fluido de trabajo, por lo tanto, para mantener un sistema de fuerzas equilibrado, la presión en el fluido será 690 veces la presión con la que se ha introducido el aire comprimido.

$$P_1 \cdot S_1 = P_2 \cdot S_2 \quad ; \quad S_1 = 690 S_2$$

$$P_1 \cdot 690 \cdot S_2 = P_2 \cdot S_2 \quad \rightarrow \quad P_1 \cdot 690 = P_2$$

Por lo tanto, si, por ejemplo, queremos ensayar a una presión de 2800 bar debemos introducir aire comprimido a una presión de, aproximadamente, 4 bar. En la Figura 4.18 se muestra un esquema interno del pistón, modelado a partir de *Inventor*.

El aire comprimido empleado para mover el pistón se controla a través del ensamblaje de conducción neumática. Es introducido en la bomba neumática a través de una electroválvula. Se trata de la válvula *Lucifer*, mostrada en la Figura 4.20, que sirve para regular la presión de entrada del aire desde el ordenador de ensayos.

El aire se distribuye de forma alterna entre la cámara inferior y superior, de tal modo que cuando el pistón se encuentre en su posición más alta, el ensamblaje de conducción neumática comenzará a introducir aire en la cámara superior y evacuará el de la cámara inferior, para empujar el pistón hasta su posición más baja. Para volver a empujar el pistón hacia arriba procederá de forma contraria.

Por último, cabe destacar la junta de alta presión. Este elemento funciona como una junta de estanqueidad, de forma que impide que el aire que está alojado en la zona de baja presión penetre en la zona donde se encuentra el fluido de trabajo, ya que podría producirse la combustión del Diesel debido a la elevada presión a la que este se encuentra. Las consecuencias, por tanto, serían terribles.

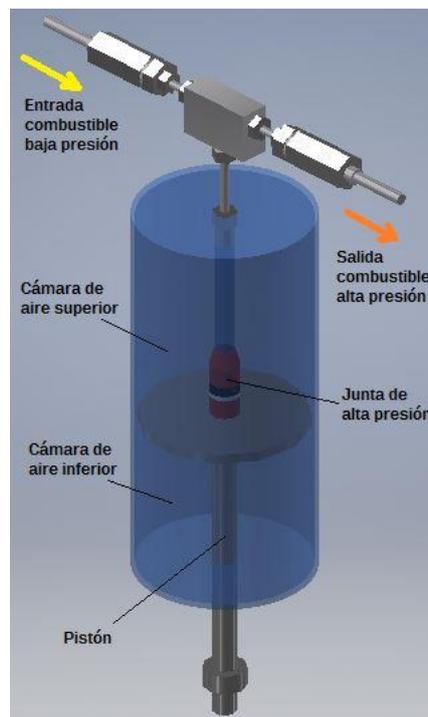


Figura 4. 18: Modelo de los componentes del pistón de la bomba neumática de AP.

Hasta aquí son los elementos que se van a montar de la instalación experimental. En los siguientes apartados se va a explicar el circuito neumático de aire (que inicialmente ya formaba parte de la bomba neumática) y la zona de alta presión, en la cual se ha diseñado un depósito de AP de 4000 bar.

#### 4.4 Componentes del circuito neumático de aire

Como se ha comentado en el apartado anterior, el aire es introducido a las cámaras del pistón mediante la electroválvula *Lucifer* y la válvula manorreguladora *AIGNEP*. Ambas válvulas ya estaban instaladas en la bomba neumática, ya que fueron empleadas para el estudio que realizó Francisco Salvador Alamar. Sin embargo, para entender el conjunto de la instalación experimental, se va a explicar el papel que desempeña cada una de ellas.

- **Válvula manorreductora AIGNEP:** puesto que el suministro de aire comprimido del CMT proporciona un caudal constante de  $80 \text{ Nm}^3/\text{h}$  a 8 bar, es necesaria una válvula que sea capaz de regular este caudal, para hacer uso del aire bajo unas condiciones de funcionamiento adecuadas a los ensayos.

Según las curvas proporcionadas por el fabricante, mostradas en la Figura 4.19, esta válvula, para 4 bar de presión de salida, mantiene el flujo de aire constante para un rango de caudal entre 1 500 litros/min y 5 000 litros/minuto. Pero nuestro consumo de aire comprimido es de  $80 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , máximo, que equivale a unos 1 333 litros/min. Esto significa que estamos fuera de la zona ideal de trabajo. Aunque la válvula no proporciona un flujo de aire inestable, introduce pequeñas oscilaciones. Recordando que el factor de multiplicación de la bomba neumática es de 1:690, un pequeño error en la presión del aire se multiplicaría por 690 en la presión del fluido de trabajo.

Para proteger a la bomba neumática de estas perturbaciones se dispone de la válvula eléctrica reguladora de presión (*Lucifer*) que se encargará de corregir esas oscilaciones.

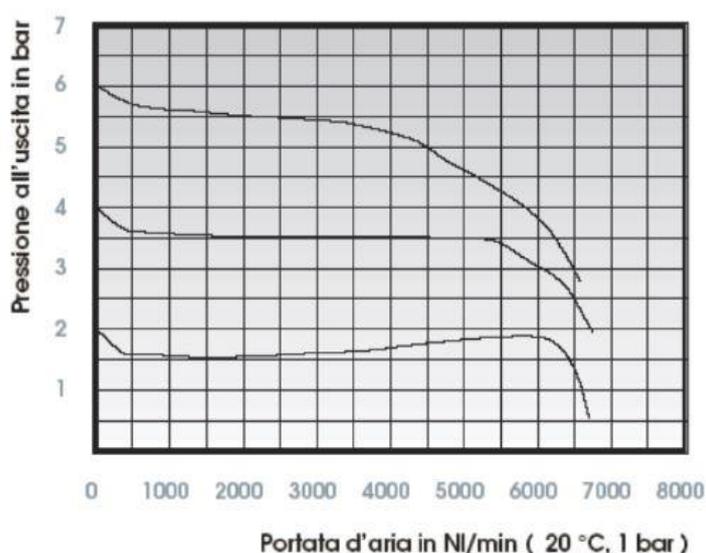


Figura 4. 19: a) Curva de funcionamiento de la válvula manorreguladora AIGNEP. [38] b) Válvula AIGNEP.

- **Válvula electroreductora PARKER:** Se trata de la válvula *Lucifer EPP4 Electronic* de Parker Hannifin Corporation. Como puede observarse en la gráfica de la Figura 4.24 a), el flujo de aire es estable para un caudal comprendido entre 5 Nm<sup>3</sup>/h y 125 Nm<sup>3</sup>/h. Luego, lo será también para 80 Nm<sup>3</sup>/h.

## Flow Curve 1/2"

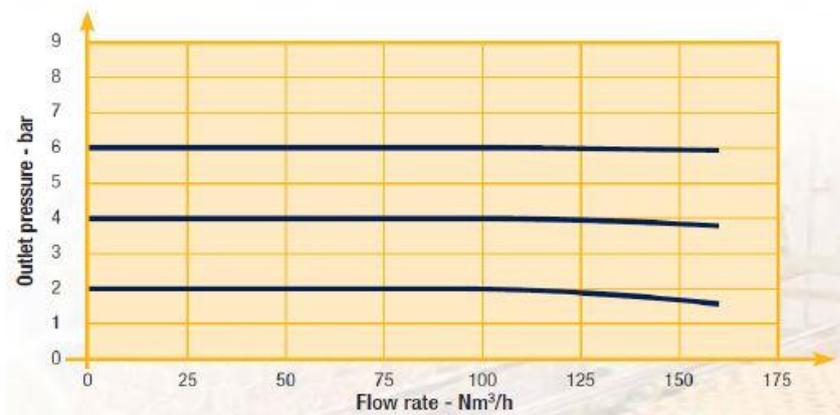


Figura 4. 20: a) Curva de funcionamiento de la válvula electrore reguladora Lucifer. b) Válvula Lucifer. [38]

La serie EPP4 se trata de una familia de reguladores de presión neumáticos, controlados eléctricamente con control electrónico integrado de circuito cerrado. Permiten regular la presión de salida proporcionalmente a una señal de control eléctrica.

El regulador comprende un servo-regulador de presión neumático tradicional, en el que la cámara piloto es alimentada por una u otra de las dos electroválvulas de 2 vías moduladas en anchura de pulso. El sensor de presión mide la presión de salida del regulador y proporciona una señal de realimentación al controlador. Cualquier diferencia entre la señal de control y la señal de realimentación se convierte en una señal digital para energizar la bobina de una u otra de las válvulas de 2 vías para corregir la posición del regulador.

La señal de control viene estandarizada como voltaje (de 0 a 10 V) o como corriente (de 4 a 20 mA). La entrada de la "válvula de llenado" está conectada directamente a la entrada principal P del regulador. Cuando está activada esta válvula llenará la servocámara para aumentar la presión en la salida A del regulador.

Cuando se excita la otra "válvula de escape", la presión de la servocámara se agotará a través de un orificio de descarga lacado entre la tapa y el cuerpo y alimentado directamente a la atmósfera, sin silenciador. El escape de la presión regulada principal se hará a través del escape rápido R.

Ambas válvulas solenoides aseguran el llenado o vaciado de la servocámara con el fin de aumentar o disminuir la presión en la salida del regulador. En posición de reposo de las válvulas, todos los puertos están bloqueados.

En la Figura 4.21 se muestra un esquema del funcionamiento descrito.

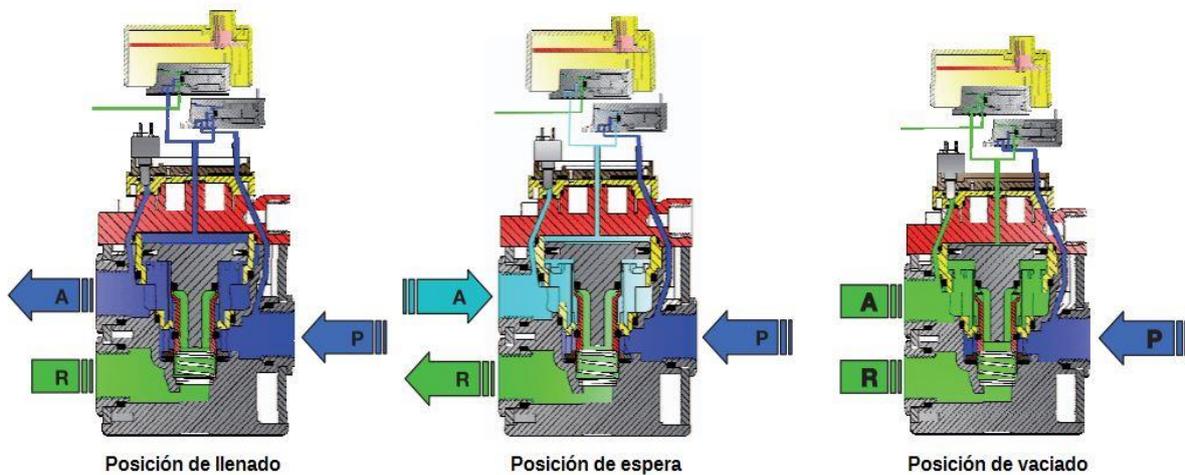


Figura 4. 21: Modelo de funcionamiento del regulador de presión. [39]

Además, la empresa *Parker Hannifin* ofrece el software *Calys* para configurar todos los parámetros de las válvulas de la serie EPP4, y monitorizar su funcionamiento desde un ordenador. Esto supone una gran ventaja, ya que los ensayos de inyección en los que se usa la maqueta se alcanzan presiones muy elevadas y supone un peligro entrar a la sala del laboratorio cuando está el sistema en marcha.

## 4.5 Elementos de la zona de alta presión

### 4.5.1 Depósito de combustible de alta presión

El raíl del sistema de inyección se encarga de acumular una cantidad de fluido presurizado, que posteriormente será evacuado a gran velocidad por los inyectores. Este volumen, además de acumular fluido, también absorbe las oscilaciones de presión que se producen, mayormente, por las pistonadas de la bomba de AP, y por la rápida salida del combustible por los orificios de salida de los inyectores.

Puesto que, tanto el caudal como la presión, a la que se van a realizar los ensayos de inyección es superior a la que utilizan los sistemas convencionales, estas oscilaciones también serán mayores. Por lo tanto, necesitamos un volumen del raíl mayor, a fin de que esas oscilaciones queden atrapadas en el propio volumen.

Este es el papel del depósito hidráulico de alta presión, al estar directamente conectado con el raíl, funcionará como una extensión de este. Cuando se realizó el estudio del comportamiento de la bomba neumática se empleó un depósito de AP de acero inoxidable 316 de la empresa *Nova Swiss Sarl*, y supuso un costo de 9000 €. Tenía una capacidad de 0,5 litros y era capaz de soportar presiones de hasta 3000 bar y temperaturas de hasta 248 °F (120 °C).

En las Figuras 4.22 y 4.23 se muestra una imagen de este depósito y un esquema interno, respectivamente.



Figura 4. 22: Foto tomada al acumulador hidráulico de alta presión.

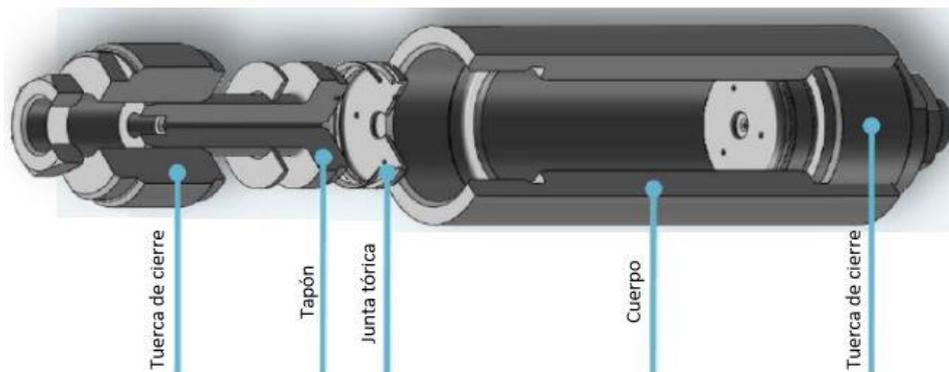


Figura 4. 23: Esquema interno del acumulador hidráulico de alta presión. [35]

Como ya se ha explicado, si queremos que la bomba neumática funcione a 2800 bar, por ejemplo, se deben fijar 4 bar en la presión de entrada de aire. Puesto que a la salida de la bomba existe este depósito cerrado, la presión en su interior irá aumentando hasta que se alcancen los 2800 bar. Justo en este momento, la bomba se parará debido a que la fuerza que existe a ambos lados del pistón es la misma.

A medida que se va expulsando combustible por los inyectores, la presión del raíl va disminuyendo. Cuando se alcanza una cierta presión mínima la bomba neumática debe volver a realizar una pistonada para introducir de nuevo Diesel el en volumen.

Para entender mejor el comportamiento de la presión en el interior del raíl durante las inyecciones, el compañero Francisco Salvador Alamar realizó varios ensayos con esta bomba neumática. Para una presión constante de 1300 bar y 2000 bar, cuyos resultados se muestran en las Figura 4.24. En estas gráficas se puede observar que para una presión más elevada (2000 bar frente a 1300 bar) las oscilaciones de presión en el interior de raíl son mayores y, además, la bomba neumática debe dar más pistonadas para un mismo tiempo, por lo que introduce más perturbaciones, como ya se ha comentado.

Como puede observarse en la gráfica de 2000 bar, la presión media es de 1800 bar. Puesto que las presiones con las que el CMT quiere empezar a ensayar oscilan entre 2800 bar y 3500 bar, está diferencia será aún mayor. Para conseguir reducir este error, se puede colocar una válvula de aguja para un control fino de caudal (válvulas *MicroMetering*), mostrada en la Figura 4.25.

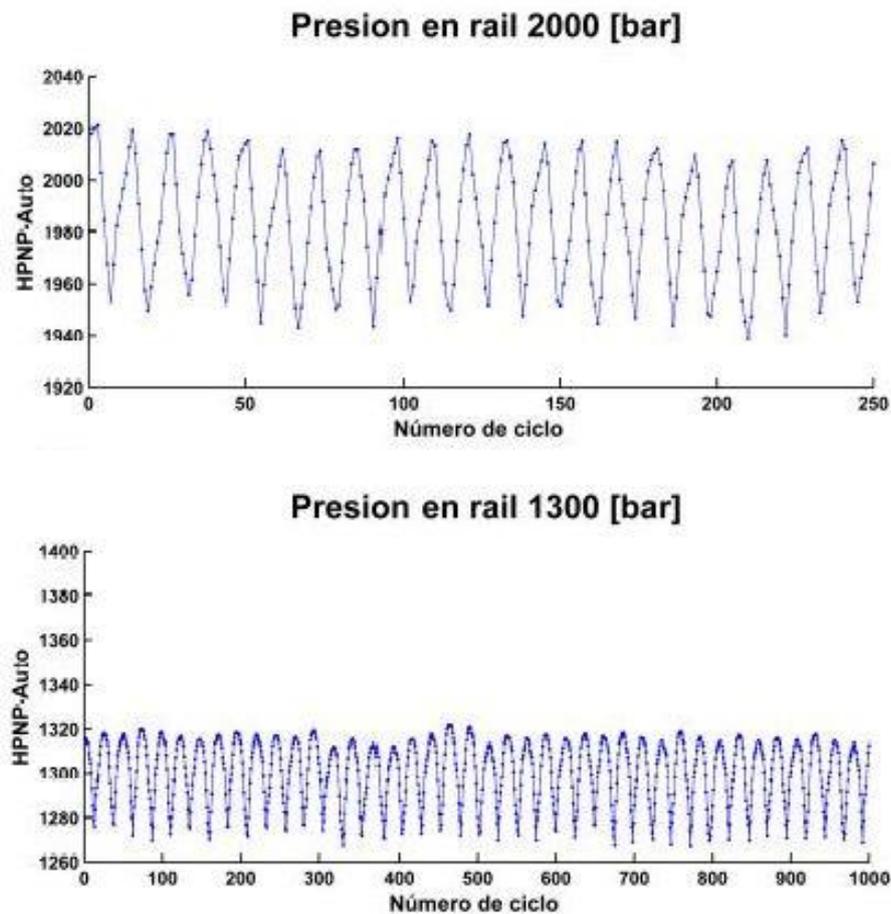


Figura 4. 24: Gráficas del comportamiento de la presión en el interior del raíl. [36]

Las válvulas *MicroMetering* están diseñadas para aplicaciones en las que se requiere un control más preciso de flujos pequeños de lo que es posible con un vástago de regulación estándar. El diseño del micrómetro del *Barril y el Dedal* permite ajustar el flujo de salida, cuyo objetivo es disminuir la presión en el raíl más rápido para provocar que la siguiente pistonada se produzca en un tiempo menor. De esta forma, la presión media del raíl estará más próxima a la fijada por el usuario existiendo menos errores.

La medición de este flujo se realiza mediante un vástago finamente cónico, tarado de fábrica. La posición de este vástago se consigue utilizando un hilo de 40 TPI (Threads per Inch – hilos por pulgada).

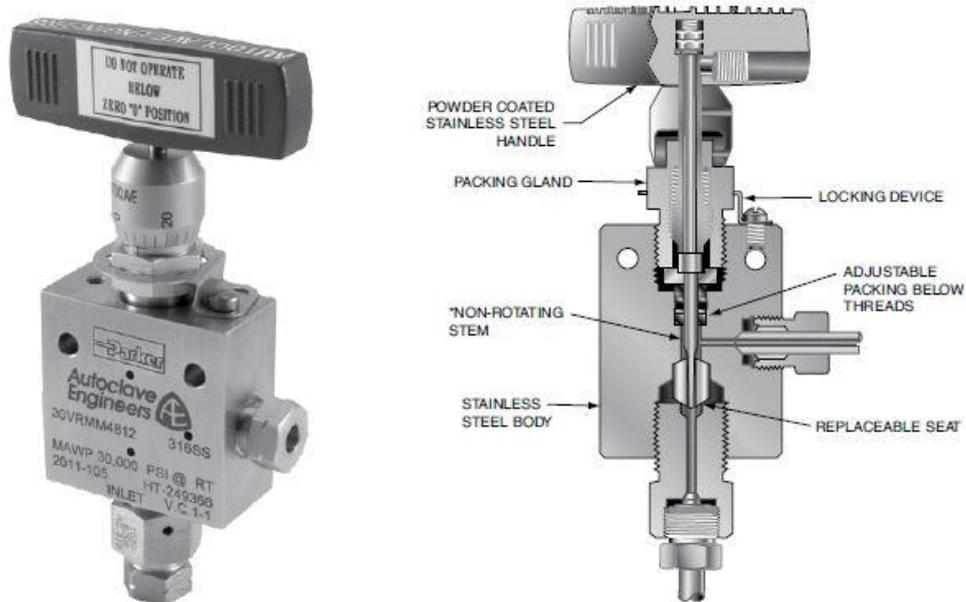


Figura 4. 25: Válvula de control micrométrica (MicroMetering). [37]

Para evitar que esta válvula alcance temperaturas muy elevadas se ha colocado dos ventiladores, uno a cada lado de la válvula, controlados desde el software del ordenador. Tal y como puede apreciarse en la imagen de la Figura 4.26.

Este tipo de válvulas están diseñadas para la medición del flujo exclusivamente, luego no pueden utilizarse como válvulas de cierre. Para la acción de cierre se ha colocado una válvula de cierre de Parker AE serie 60 VM en el extremo opuesto del depósito, mostrada en la Figura 4.27.



Figura 4. 26: MicroMetering equipada con dos ventiladores.



Figura 4. 27: Válvula de seguridad del depósito de AP.

Por otro lado, este depósito solo soporta presiones que no superen los 3000 bar. Puesto que la bomba neumática es de 4000 bar, se está desaprovechando parte de la potencia que puede entregar. Por lo tanto, durante este proyecto se ha diseñado un depósito de AP de un litro de capacidad que sea capaz de soportar 4000 bar sin sufrir daños. Debido a que no se ha dispuesto de tiempo suficiente, solo se ha realizado su diseño, el cual aparece reflejado en el documento planos.

La razón por la que se ha diseñado este nuevo depósito en lugar de comprar otro a la misma empresa a la que se compró el actual, radica en el costo. Un depósito de estas características supone un costo de 35000 €.

A continuación, se muestra el principio de cálculo que se ha seguido para su diseño.

#### 4.5.2 Nuevo depósito de combustible de alta presión

Se pretende construir un depósito cuyo diseño sea parecido al de la Figura 4.23. La capacidad de este nuevo depósito debe ser de un litro (el doble que la del depósito actual de la bomba neumática).

Para ello se ha diseñado dos vasos, cuyos planos aparecen en el documento IV, que serán soldados mediante soldadura a tope en V simple y en todo el contorno de la pieza. Esta soldadura puede apreciarse en el plano de conjunto 120.40. Cada vaso tiene una capacidad de 0,5 litros y se han diseñado con unos radios de acuerdo sobredimensionados para reducir las tensiones.

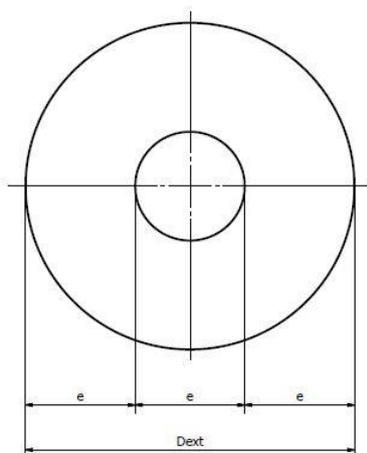
Para dimensionar estos vasos se ha seguido la información proporcionada por el catálogo de *Parker Autoclave Engineers*, el cual ofrece una selección completa de tubos de acero inoxidable austenítico embutidos en frío. Estos tubos de alta presión se fabrican específicamente para aplicaciones de alta presión que requieren alta resistencia al esfuerzo y a la corrosión. En la Figura 4.28, se muestra la tabla que aparece en el catálogo, en la cual se puede apreciar que un tubo de acero inoxidable 316SS, cuyo diámetro exterior es tres veces el diámetro interior, para una temperatura de trabajo de hasta 204°C, es capaz de soportar sin romperse una presión de 3971,66 bar.

Siguiendo el criterio de la semejanza:

$$\Delta e = 3e = D_{ext} \quad (4.13)$$

Para un espesor de tubo de 40 mm:

$$l = Vol / \pi \cdot (e/2)^2 = 500\,000\,mm^3 / \pi \cdot (40\,mm/2)^2 \approx 400\,mm \quad (4.14)$$



Por último cabe destacar, que en los vasos se ha practicado un segundo orificio para alojar la válvula *MicroMetering*. Este orificio tiene un diámetro interno de 1 mm, por lo que el control de caudal será muy fino.

Catalog Number	Tube Material	Fits Connection Type	Tube Size Inches (mm)			Flow Area in. <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> )	Working Pressure psi (bar)*				
			Outside Diameter	Inside Diameter	Wall Thickness		-423 to 100°F -252 to 37.8°C	200°F 93°C	400°F 204°C	600°F 316°C	800°F 427°C
MS15-202	Stainless	(See note 3)					100,000 (6894.64)	100,000 (6894.64)	96,210 (6633.24)	90,368 (6230.55)	84,420 (5820.46)
MS15-081	316SS	F250C	1/4 (6.35)	0.083 (2.11)	0.083 (2.11)	0.005 (3.23)	60,000 (4136.79)	60,000 (4136.79)	57,750 (3981.66)	54,250 (3740.35)	50,700 (3495.59)
MS15-182	304SS						60,000 (4136.79)	56,800 (3916.16)	51,650 (3561.09)	50,700 (3495.59)	48,450 (3340.46)
MS15-082	316SS	F312C150	5/16 (7.94)	0.062 (1.57)	0.125 (3.18)	0.003 (1.94)	150,000 (10341.97)	150,000 (10341.97)	144,400 (9955.87)	136,350 (9400.85)	126,750 (8738.97)
MS15-201	Stainless	(See note 3)					100,000 (6894.64)	100,000 (6894.64)	96,210 (6633.24)	90,368 (6230.55)	84,420 (5820.46)
MS15-087	316SS	F375C	3/8 (9.53)	0.125 (3.18)	0.125 (3.18)	0.012 (7.74)	60,000 (4136.79)	60,000 (4136.79)	57,750 (3981.66)	54,250 (3740.35)	50,700 (3495.59)
MS15-183	304SS						60,000 (4136.79)	56,800 (3916.16)	51,650 (3561.09)	50,700 (3495.59)	48,450 (3340.46)
MS15-210	Stainless						100,000 (6894.64)	100,000 (6894.64)	96,210 (6633.24)	90,368 (6230.55)	84,420 (5820.46)
MS15-083	316SS	F562C	9/16 (14.29)	0.188 (4.78)	0.187 (4.75)	0.028 (18.06)	60,000 (4136.79)	60,000 (4136.79)	57,750 (3981.66)	54,250 (3740.35)	50,700 (3495.59)
MS15-185	304SS						60,000 (4136.79)	56,800 (3916.16)	51,650 (3561.09)	50,700 (3495.59)	48,450 (3340.46)
MS15-090	316SS	F562C40	9/16 (14.29)	0.250 (6.35)	0.156 (3.96)	0.048 (30.97)	40,000 (2757.86)	40,000 (2757.86)	38,500 (2654.44)	36,100 (2488.96)	33,800 (2330.39)
MS15-209	Stainless	F562C40-312	9/16 (14.29)	0.312 (7.92)	0.125 (3.18)	0.076 (49.03)	40,000 (2757.86)	40,000 (2757.86)	38,500 (2654.44)	36,100 (2488.97)	33,800 (2330.39)
MS15-211	316SS	F1000C43	1 (25.40)	0.438 (11.13)	0.281 (7.14)	0.151 (97.42)	43,000 (2964.70)	43,000 (2964.70)	43,000 (2964.70)	41,380 (2853.01)	36,330 (2504.83)

Figura 4. 28: Información técnica de los tubos de alta presión de Parker Autoclave Engineers. [39]

A través de un tubo de poliuretano de 12 mm de diámetro, el combustible presurizado será expulsado del depósito y enviado al raíl, donde se encuentran conectados los inyectores a ensayar, Figura 4.29. Puesto que este raíl se encuentra directamente conectado a la maqueta de la IAPAT, no se va a explicar, ya que no forma parte de la instalación de alimentación de combustible construida.



Figura 4. 29: Foto del raíl conectado a la IAPAT.

## 4.6 Otros elementos

- **Caja de alimentación eléctrica.** La bomba de BP, el presostato y la electroválvula están controlados electrónicamente desde el ordenador del laboratorio. Por lo tanto, es necesario construir una placa base para conectarlos. El ingeniero electrónico del CMT se ha encargado de programar y construir el circuito eléctrico de la instalación. Este circuito se compone de:

### Fuente de alimentación:

Los tres elementos a controlar son de 24 V. Por lo tanto, se necesita una fuente de alimentación para convertir la tensión alterna de 230 V de la red en una tensión continua de 24 V.

### Interruptor magnetotérmico:

Se trata de un elemento de seguridad para proteger la instalación frente a sobrecargas y cortocircuitos. Se encarga de cortar la corriente eléctrica que atraviesa el circuito cuando alcanza valores por encima de los máximos establecidos.

### Un relé:

El presostato dispone de un relé que se encarga de mandar una señal eléctrica a la bomba de BP para que esta se conecte y desconecte, según corresponda.

Un relé es un componente electromagnético que funciona como un interruptor controlado por un circuito eléctrico, el cual, a través de una bobina, acciona unos contactos que se encargan de abrir o cerrar otro circuito independiente, que en este caso es el de la bomba de BP. En la Figura 4.30, el relé, la bobina y los contactos vienen representados por *KM1*.

### Circuitos del regulador de aire de la bomba neumática de AP:

Como ya se ha comentado, la válvula reguladora de presión *Lucifer* se controla desde el exterior de la sala de ensayos, mediante un ordenador. Por lo que necesitará recibir una señal eléctrica que estará controlada a través del *Arduino* (microcontrolador).

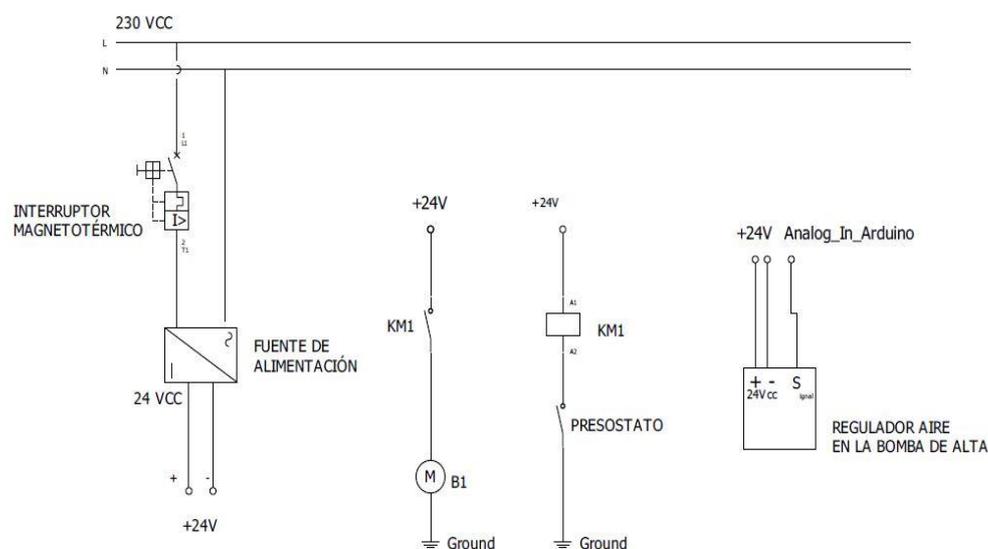


Figura 4. 30: Circuito eléctrico de la instalación.

## Capítulo 5

### RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Una vez descritos todos los elementos se va a presentar el montaje final de la instalación experimental y se va a explicar paso a paso como se ha realizado. Por último, se pondrá en marcha para comprobar que el sistema funciona correctamente.

#### 5.1 Resultados

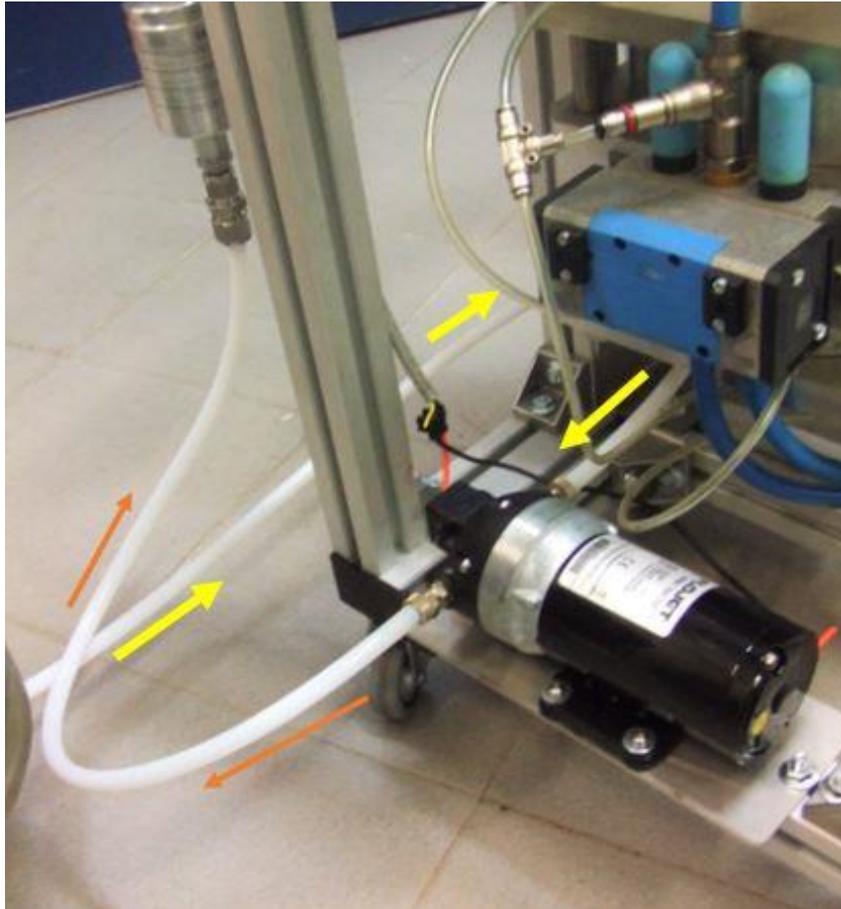
El montaje se ha llevado a cabo siguiendo el diseño que aparece en las Figuras 4.1 y 4.2. En la Figura 5.1 se muestra una foto tomada a la instalación experimental construida, la cual está conectada a la IAPAT. Sin embargo, durante la realización del proyecto algunos aspectos del diseño han sido modificados.



*Figura 5. 1:Montaje de la instalación experimental.*

En primer lugar, se montó la zona de baja presión. Es decir, desde el depósito de baja presión hasta la entrada de la bomba neumática.

En un lateral de la estructura, junto a la bomba neumática, se ha instalado la electrobomba. Las flechas amarillas indican la circulación del flujo de combustible desde el depósito de BP hasta la electrobomba. Y las flechas naranjas, desde la electrobomba hasta el filtro. Para ambos conductos se ha empleado un tubo flexible de 12 mm de diámetro.



*Figura 5. 2: Foto de la electrobomba.*

En la parte trasera se ha sujetado, mediante abrazaderas, el presostato y el vaso expansor. Parte del combustible es desviado al presostato, el cual está conectado a la electrobomba mediante un cable de tres hilos. Las conexiones realizadas aparecen en la Figura 5.4. El cable amarillo-verde es la toma de tierra, y los cables negros son el COM y la conexión de normalmente cerrado del contacto. De igual forma, otra parte del flujo de combustible es desviado al vaso expansor, el cual acumula Diesel mientras se encuentra funcionando la electrobomba. A diferencia de los conductos anteriores ahora se han colocado tubos rígidos de acero.

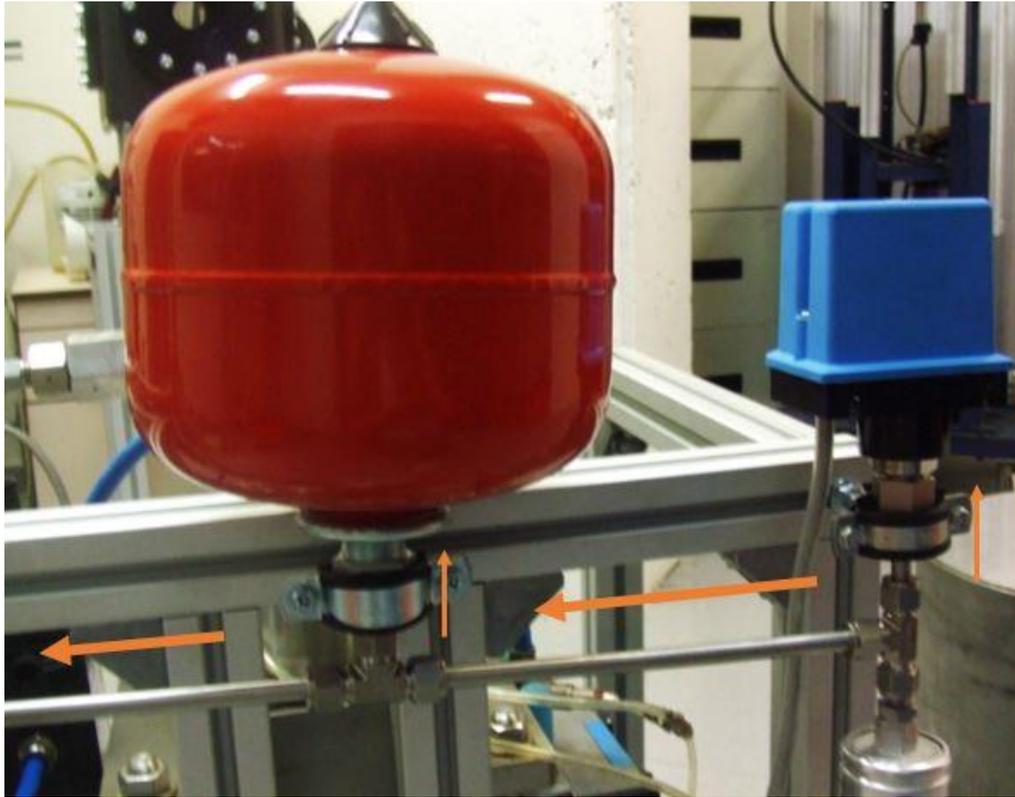


Figura 5. 3: Foto del presostato y del vaso expensor.



Figura 5. 4: Conexiones eléctricas del presostato con la electrobomba.

A la salida del vaso expensor, el combustible se encuentra con un manómetro y un termopar, para controlar las condiciones de entrada del Diesel a la bomba neumática de alta presión. Cabe destacar que en el primer montaje el orden de estos dos elementos está cambiado, es decir, está colocado primero el termopar y después el manómetro. Por comodidad se decidió cambiarlos.



Figura 5. 5: Manómetro y termopar de la instalación experimental.

Por lo tanto, la zona de baja presión queda como:

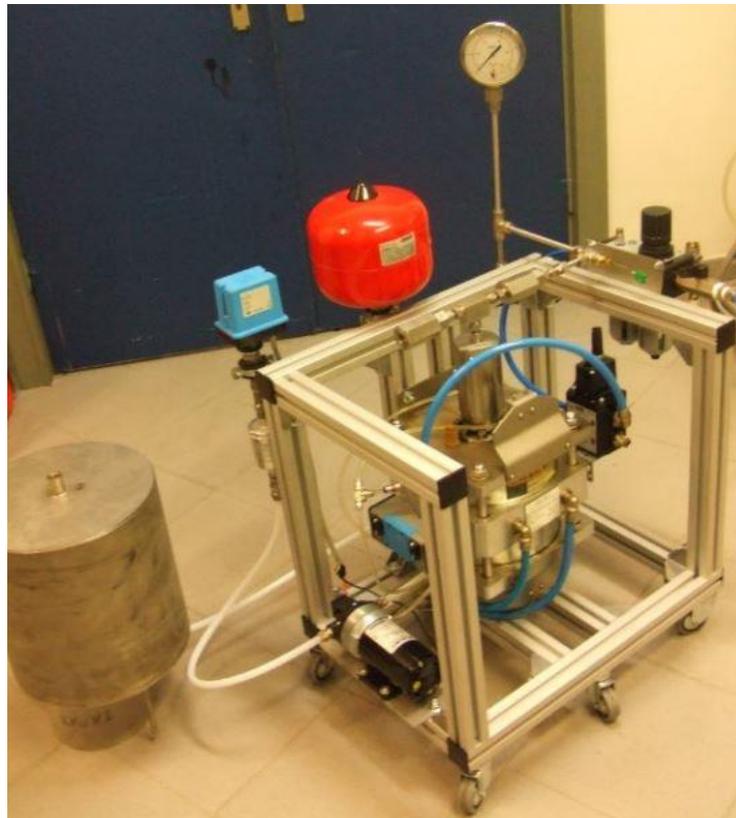


Figura 5. 6: Montaje de la zona de baja presión de la instalación experimental.

En segundo lugar, se llevó a cabo el montaje de la zona de alta presión. Que consiste únicamente en el depósito de AP, cuyas mejoras han sido la incorporación de una válvula de control fino de flujo y una válvula de seguridad, explicadas en el capítulo 4.

El flujo de combustible se ha hecho llegar por la parte inferior del depósito de AP mediante un tubo rígido de acero. Y a la salida de este se ha conectado una manguera flexible de poliuretano que llega hasta el raíl mostrado en la Figura 4.29.



*Figura 5. 7: Montaje del depósito de AP.*

El último paso para comprobar que se ha cumplido con los objetivos es ponerla en funcionamiento y comprobar que el flujo de Diesel es capaz de recorrer sin problemas el circuito hidráulico desde que sale del depósito de baja presión hasta que alcanza los inyectores.

Para poner en marcha la instalación experimental se debe encender en primer lugar el cuadro eléctrico que se encuentra alojado junto a la IAPAT (que conectará la fuente de alimentación, la bomba de BP, el presostato y el regulador de la bomba neumática).

Desde el ordenador situado en el despacho contiguo a la sala de ensayos se introducen los parámetros a los que se desea ensayar, tales como la presión de salida de la bomba neumática, la duración de la inyección y la apertura de los orificios de la tobera del inyector.

Para comprobar el funcionamiento de la instalación experimental, primero se probó la zona de baja presión. Para ello, no se conectó el raíl, de forma que el combustible era inyectado directamente al depósito de alta presión que se encontraba despresurizado (ya que estaba libre a la atmósfera). Los resultados de esta prueba fueron positivos, ya que la bomba neumática de alta presión entregaba el combustible correctamente.

Para probar la parte de alta presión se instaló el raíl, de modo que el depósito de alta presión pudiese presurizarse. Este raíl solo tiene conectado un inyector, el cual se encuentra sujeto por un porta-inyector e introducido en la cámara de ensayos de la *IAPAT*, por lo que no puede verse. El resto de los orificios del raíl se encuentran bloqueados por varios tapones. Cuando se puso en marcha la instalación experimental, la información útil recibida por el sensor que dispone el raíl indicó que las condiciones de funcionamiento eran las deseadas. Por lo que, podía asegurarse que la instalación experimental funcionaba correctamente.

## 5.2 Conclusiones

Después de comprobar el correcto funcionamiento de la instalación, se puede concluir que sí hemos conseguido alcanzar uno de los objetivos de este proyecto, ya que se ha obtenido una instalación de alimentación de combustible para una bomba neumática de alta presión empleada para una maqueta destinada a la generación de alta presión.

Esta instalación podrá ser usada, de aquí en adelante, por el Centro de Motores Térmicos para la realización de ensayos de nuevos proyectos de inyección.

## Capítulo 6

### PROYECTOS FUTUROS

Como se ha comentado en el Capítulo 2, una de las alternativas para mejorar la maqueta de inyección consistía en aumentar el caudal que la bomba entregaba al raíl, con el objetivo de introducir más cantidad de combustible en el mismo tiempo, mejorándose así el proceso de combustión de los MEC. La idea era conectar en paralelo con la bomba neumática otra de las mismas características, para duplicar el caudal de Diesel manteniendo constante la presión instalada. Esta alternativa se descartó debido a que no tenía sentido aumentar la potencia de la instalación sin antes construir un sistema estable de alimentación para esta bomba.

Después de este proyecto, puesto que la bomba neumática ya dispone de una instalación adecuada para suministrar Diesel a un sistema *Common-Rail* de forma segura y controlada, ya se podría llevar a cabo la instalación de esta segunda bomba.

Para realizar este nuevo proyecto, se deberá modificar la estructura completa, ya que la bomba neumática tiene un tamaño de 450 x 345 x 405 mm, siendo necesario ampliar el carro donde va montada la instalación. El Departamento de Motores Térmicos, actualmente, dispone de otra bomba neumática *HPAP-40/4E/SE* (ya que se compraron dos unidades en el 2015), sin embargo, una vez finalizado este proyecto el CMT pretende construir una segunda instalación idéntica a la construida en este trabajo (ya que se dispone de dos maquetas de ensayo *IAPAT*).

Por lo tanto, sería necesario comprar dos nuevas bombas neumáticas. Del mismo modo, sería necesario disponer de una válvula *Lucifer* para cada nueva bomba neumática, ya que una sola no es capaz de controlar ambas bombas a la vez, o bien buscar una nueva válvula de mayor potencia para controlar ambas.

Por otro lado, quedaría también presupuestar el depósito de AP diseñado y valorar si la opción de compra a la empresa *Nova Swiss Sarl* es más rentable. Debido a que la realización de la soldadura a tope en V puede resultar costosa, ya que la cantidad del material de aportación puede superar los 4 kg, puede estudiarse la alternativa de la soldadura por fricción, aunque esta última no se encuentra totalmente desarrollada en España. En cualquier caso, si se decide llevar a cabo la construcción de este depósito deberán realizarse ensayos destructivos para comprobar que la soldadura aguanta los 4000 bar de presión.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Robert Bosch, *Sistemas de inyección diesel por acumulador*. Common Rail, Editorial Reverté, 2005.
- [2] Web oficial de la UPV, <http://www.cmt.upv.es/P00.aspx>.
- [3] Imagen de la maqueta de inyección construida por el Centro de Motores Térmicos en 2008, [https://www.upv.es/noticias-upv/imagenes/thiesel2016\\_int.jpg](https://www.upv.es/noticias-upv/imagenes/thiesel2016_int.jpg)
- [4] Miguel de Castro, *Inyección de gasolina*, Biblioteca CEAC del automóvil, 1995.
- [5] Web El Hinél,  
[http://www.elhinel.com.ar/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1212&Itemid=524](http://www.elhinel.com.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=1212&Itemid=524)
- [6] Imagen del funcionamiento de un acumulador hidráulico,  
<http://www.valvehydraulic.info/hydraulic-accessories/bladder-type-separator-gas-loaded-hydraulic-accumulator.html>
- [7] Imagen esquema de funcionamiento de un presostato,  
<https://www.bmwfaq.org/threads/presostato.851343/>
- [8] Información obtenida de las diapositivas de la asignatura *Motores Térmicos para Automoción*, impartida por el CMT. Tema 4 2016.
- [9] Prof. F. Payri, Prof. J. M. Desantes, *Motores de combustión interna alternativos*, Editorial Reverté, Editorial UPV, 5ª Edición 2015.
- [10] Imagen sobre las características del proceso de combustión en MEC, extraída de las diapositivas de la asignatura *Motores Térmicos para Automoción*. Tema 4 *Estrategias para aumentar la potencia*, 2016.
- [11] Imagen de la estrategia basada en el *downsizing*, extraída de las diapositivas de la asignatura *Motores Térmicos para Automoción*. Tema 6 *Estrategias para reducir el CO<sub>2</sub>*, 2016.
- [12] Información obtenida de las diapositivas de la asignatura *Motores Térmicos para Automoción*, impartida por el CMT. Tema 5 *Estrategias para reducir las emisiones contaminantes*, 2016.
- [13] Imagen de la composición de los gases de escape, extraída de las diapositivas de la asignatura *Motores Térmicos para Automoció*. Tema 5 *Estrategias para reducir las emisiones contaminantes*, 2016
- [14] Imagen de soluciones activas para reducir emisiones en MEC, extraída de las diapositivas de la asignatura *Motores Térmicos para Automoción*. Tema 5 *Estrategias para reducir emisiones contaminantes*, 2016.
- [15] Guardiola García, Carlos Ruiz Rosales, Santiago Pla Moreno, Benjamín Blanco Rodríguez David, *Motores térmicos para ingeniería mecánica*, Editorial UPV, 1ª Edición 2014.
- [16] Imagen del diagrama de 4 tiempos de un motor MEP, extraída del vídeo *What is the difference between Two Stroke and Four Stroke Engines*, <https://www.youtube.com/watch?v=a00Q6a3B8H0>
- [17] J. Arrègle, J. Galindo, J.V. Pastor, J.R. Serrano, J.A. Broatch, J.M. Luján, R. Payri, A.J. Torregosa, *Procesos y Tecnología de Máquinas y Motores Térmicos*, Editorial UPV, 1ª Edición 2014.

- [18] Imagen de los distintos sistemas de inyección, extraída de la Web *Electrotecnia y Mecánica*, de Las Palmas Tecnológica, <http://laspalmastecnologica.blogspot.com.es/2015/02/motores-tema-32-componentes-motorculata.html>
- [19] Imagen del Common-Rail, extraída del libro *Motores de combustión interna alternativos* [9].
- [20] Imagen bombas de baja presión, procedente del blog *Aficionados de la Mecánica*, [http://www.aficionadosalamecanica.net/common\\_rail2.htm](http://www.aficionadosalamecanica.net/common_rail2.htm)
- [21] Web *Aficionados de la Mecánica*, <http://www.aficionadosalamecanica.net/>
- [22] Imagen bomba rotativa de engranajes, procedente del enlace [http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica\\_hidraulica9.htm](http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica_hidraulica9.htm)
- [23] Imagen filtro Diesel, extraída de la Web *FilterLocation*, <http://filterlocation.com/car-fuel-filter/>
- [24] Imagen esquema de una bomba de alta presión, procedente del blog *Aficionados de la Mecánica*, [http://www.aficionadosalamecanica.net/common\\_rail3.htm](http://www.aficionadosalamecanica.net/common_rail3.htm)
- [25] Imagen del raíl y el sensor de presión del raíl, procedente del blog *Aficionados de la Mecánica*, <http://www.aficionadosalamecanica.net/sensores4.htm>
- [26] Imagen inyector tipo selenoide, procedente del enlace <http://decbg.com/remont-na-common-rail-injectors-za-leki-i-tovarni-avtomobili-bosch-delphi-siemens-denso-etc.html>
- [27] Imagen inyector-bomba, extraída de las diapositivas de la asignatura *Motores Térmicos para Automoción*. Práctica 2 *Sistemas de inyección*, 2016.
- [28] Imagen fases de la combustión, extraída de las diapositivas de la asignatura *Motores Térmicos para Automoción*. Tema 5 *Estrategias para reducir las emisiones contaminantes*, 2016
- [29] José Fernando Salazar Valdez, *DISEÑO DE EQUIPOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR* (Tesis Doctoral). Recuperada de <http://eprints.uanl.mx/4681/1/1020145448.PDF>
- [30] Web Técnica de Fluidos, *Catálogo FLOJET Triplex Hi-pressure Pumps*, <http://www.xylemflowcontrol.com/beverage-dispensing/motor-operated-diaphragm-pumps/triplex-hi-pressure-pumps.htm>
- [31] Información del filtro combustible KL 182, extraída del enlace <https://www.recambioscoche.es/mahle-original-2679372.html>
- [32] Web InproGroup. Distribuidores de productos neumáticos. <http://www.inprogroup.net/es/producto/presostato>
- [33] Web InproGroup. Distribuidores de productos neumáticos. <http://www.inprogroup.net/es/producto/vasos-expansion>
- [34] Imágen manómetro, procedente del enlace <http://neumatica-es.timmer-pneumatik.de/artikel/artbild/maxi/m-su-40-ku.jpg>
- [35] Web NovaSwiss. Fabricantes de componentes y sistemas de alta presión para aplicaciones críticas de servicio. [www.novaswiss.fr](http://www.novaswiss.fr)

[36] Francisco Salvador Alamar, *DISEÑO Y PUESTA EN MARCHA DE UNA NOVEDOSA BOMBA NEUMÁTICA PARA LA GENERACIÓN DE MUY ALTA PRESIÓN* (Trabajo de Final de Grado). Recuperada de <http://hdl.handle.net/10251/69298>

[37] Web Parker, *VRMM Series – MicroMetering Valve Catalog*, <http://www.parker.com/Literature/Instrumentation%20Products%20Division/WebSphere%20Support%20Material/VRMM%20Series%20-%20MicroMetering%20Valve%20Catalog.pdf>

[38] Web Aignep. Fabricantes de componentes neumáticos. <https://www.aignep.com/esl/F.R.L/Serie-FRL>

[39] Web Parker, *Lucifer EPP4 Electronic Proportional Regulator Catalog 0728P*, [https://www.parker.com/literature/Literature%20Files/pneumatic/Literature/FRL/0728P\\_Lucifer\\_EP4.pdf](https://www.parker.com/literature/Literature%20Files/pneumatic/Literature/FRL/0728P_Lucifer_EP4.pdf)

[40] Web Parker, *High Pressure F Series Cone and Thread Fittings Catalog*, <http://www.parker.com/Literature/Instrumentation%20Products%20Division/WebSphere%20Support%20Material/High%20Pressure%20F%20Series%20Cone%20and%20Thread%20Fittings.pdf>



**Documento II**

**Pliego de condiciones**

## ÍNDICE DEL DOCUMENTO

<b>1. CONDICIONES GENERALES</b> .....	78
1.1 Introducción .....	78
1.2 Condiciones generales del laboratorio .....	78
1.3 Condiciones generales de la instalación y equipos .....	79
1.4 Reglamentos y normas a cumplir durante su puesta en marcha .....	79
<b>2. CONDICIONES TÉCNICAS</b> .....	80
2.1 Introducción .....	80
2.2 Secuencia de arranque y paro de la instalación .....	80
2.2.1 Secuencia de arranque .....	80
2.2.2 Secuencia de paro.....	80
2.3 Mantenimiento de la instalación.....	81

## Capítulo 1

### CONDICIONES GENERALES

#### 1.1 Introducción

En este capítulo se van a exponer todos los requisitos que son de obligado cumplimiento, tanto en la sala donde se van a realizar los ensayos como en el manejo de la instalación experimental, y las reglas y normas que se deben seguir para que no exista ningún peligro para las personas que operen con la presente maqueta.

#### 1.2 Condiciones generales del laboratorio

Se entiende como *Sala de Ensayos* un recinto con la instrumentación necesaria para llevar a cabo pruebas experimentales y que cumple con unas condiciones de higiene y seguridad adecuadas. Estas salas están sujetas a las siguientes condiciones:

- **Ventilación:** El sistema de renovación de aire de una sala de laboratorio ha de ser capaz de evacuar la energía que ha sido desprendida durante la realización de los ensayos, así como de preservar un clima apropiado. En caso de que el aire de la sala se vea dañado, este debe ser expulsado por los sistemas extractores y sustituido por uno limpio.

Ambas salas de ensayo tienen un sistema de renovación de aire mediante circulación natural, que es compartido con todo el edificio. Por lo tanto, los sistemas extractores disponen de filtros y ventiladores para purificar el aire que circula a través de ellos, ya que en ambos ensayos se usa gasoil, que es una sustancia química.

- **Dimensiones del espacio:** el tamaño de las salas de ensayo debe ser aquel que permita operar de forma cómoda y segura sin que existan obstáculos para realizar cualquiera de las operaciones, ya sea montaje, mantenimiento o actividad de los equipos. Asimismo, existen salidas directas hacia espacios abiertos, para que en caso de peligro sea fácil de evacuar el personal que se encuentre en la sala.
- **Suelo de seguridad:** la probabilidad de que alguno de los equipos fugue, ya sea agua, etilenglicol o Diesel, es alta por lo que el suelo de ambas salas de ensayo es antideslizante, para prevenir de posibles caídas.
- **Acceso restringido:** A las salas solo pueden acceder personas autorizadas que tengan conocimientos sobre los ensayos que se están realizando. Asimismo, cuando los equipos están en funcionamiento, el acceso a la sala está prohibida para cualquier persona, excepto la persona responsable que esté en ese momento.

### 1.3 Condiciones generales de la instalación y equipos

Las condiciones mínimas que debe cumplir la instalación experimental son:

- Todas las conexiones eléctricas deben estar perfectamente recogidas dentro del cuadro eléctrico y no dejar en el suelo ningún cable, para evitar posibles estirones y caídas.
- Los elementos mecánicos que puedan causar daños deben de estar separados mediante una protección.
- Todos los elementos para controlar el estado del fluido en las distintas partes de la instalación, como son los sensores de presión y termopares, deben funcionar correctamente.
- Las botellas de nitrógeno empleadas para simular la contrapresión durante los ensayos de tasa deben ser estancas.
- Todos los elementos de seguridad deben cumplir las normas y seguir un mantenimiento periódico.
- El botiquín de primeros auxilios que se encuentra en el laboratorio debe estar en un lugar de fácil acceso y disponer de todos los utensilios necesarios para atender al personal en caso de lesión o daño.

### 1.4 Reglamentos y normas a cumplir durante su puesta en marcha

El personal que vaya a realizar la puesta en marcha de la instalación debe seguir una serie normas para asegurar que no existan problemas cuando se estén llevando a cabo los ensayos.

- Antes de poner en marcha ninguno de los elementos de la instalación se debe asegurar que todas las conexiones están realizadas adecuadamente y que ninguno de los equipos está dañado.
- Poner en marcha las bombas de recirculación de agua y comprobar que no existen fugas, ni en la red del laboratorio ni en los equipos.
- En caso de fugas, parar inmediatamente los equipos. Identificar el motivo de la fuga y limpiar el área afectada.
- Para evitar que cualquier persona no autorizada entre a la sala de ensayos, se debe cerrar siempre la puerta de la sala.
- Durante el funcionamiento de los equipos, todos los miembros del laboratorio deben permanecer en el despacho contiguo. En caso de ser necesario entrar en la sala lo hará únicamente el responsable del ensayo o aquella persona que ha sido autorizada por este.

## Capítulo 2

### CONDICIONES TÉCNICAS

#### 2.1 Introducción

En este capítulo se va a explicar la metodología que se debe seguir para poner en funcionamiento la instalación experimental, así como su paro. Por último, se explicará las operaciones de mantenimiento que se deben llevar a cabo para asegurar una mayor vida útil de la instalación y verificar que se cumplen los requisitos de seguridad.

#### 2.2 Secuencia de arranque y paro de la instalación

##### 2.2.1 Secuencia de arranque

Para poner en funcionamiento la instalación experimental construida deben seguirse los siguientes pasos:

- Asegurar que circula agua por la red de tuberías del laboratorio y abrir las llaves de paso correspondientes, que en este caso son las que están conectadas al depósito de combustible de baja presión.
- Abrir la llave de paso del aire comprimido para alimentar el mecanismo de funcionamiento de la bomba neumática.
- Verificar todas las conexiones eléctricas, encender el ordenador y arrancar los programas necesarios para realizar los ensayos.
- Verificar el estado del vaso expansor y el presostato.
- Encender el cuadro de alimentación eléctrico y el interruptor general.
- Poner en funcionamiento la instalación mediante el control remoto del ordenador.

##### 2.2.2 Secuencia de paro

La secuencia que debe seguirse es la misma pero en sentido inverso:

- Apagar la instalación mediante el control remoto del ordenador, reduciendo la presión al mínimo poco a poco hasta cero.
- Apagar el cuadro de alimentación eléctrico y el interruptor general.
- Cerrar los programas empleados durante el ensayo (guardando previamente los ficheros con los resultados generados) y apagar el ordenador.
- Cerrar la llave de paso del aire comprimido.
- Cerrar la llave de paso del suministro de agua.

### 2.3 Mantenimiento de la instalación

Como ya se ha comentado en capítulos anteriores, con los cambios introducidos en la instalación experimental no sería necesario un mantenimiento muy periódico ni tampoco excesivamente riguroso. Esto es posible, en gran parte, por el papel del conjunto vaso expansor-presostato ya que aumentan la estabilidad y seguridad del sistema en su conjunto.

No obstante, para asegurar que las medidas que se están obteniendo en los ensayos son correctas y no existe ningún error en ellas, es preciso realizar algunas operaciones básicas de mantenimiento, como son:

- Verificar que el depósito de combustible de baja presión siempre dispone de un nivel mínimo de Diesel.
- Comprobar que no existen fugas en los conductos. Esto puede hacerse simplemente pasando un papel por las tuberías y comprobando que queda limpio. Es muy normal que los conductos por los que circula el combustible (especialmente, los que pertenecen a la zona de alta presión) se deterioren con el tiempo y uso.
- Comprobar que los cables y conexiones eléctricas estén en buen estado, para evitar posibles peligros al personal o a los equipos.

A largo plazo, un mantenimiento adecuado sería:

- Revisar termopares y sensores de presión y calibrarlos si es necesario.
- Limpiar en depósito de combustible de baja presión.
- Cambio del filtro de combustible.

**Documento III**

**Presupuesto**

## ÍNDICE DEL DOCUMENTO

1. PRESUPUESTO GENERAL .....	84
1.1 Introducción .....	84
1.2 Cálculo de los costes.....	84
1.2.1 Coste mano de obra .....	84
1.2.2 Coste de los equipos.....	85
1.2.3 Coste de los materiales.....	85
1.2.3.1 Coste de la estructura de aluminio.....	86
1.2.2.2 Coste del depósito de combustible de baja presión.....	86
1.2.4 Coste de los materiales fungibles.....	87
1.2.5 Coste total .....	87
1.3 Método de cálculo.....	88
1.3.1 Método de cálculo para los costes de la mano de obra.....	88
1.3.2 Método de cálculo para los costes de los equipos.....	88

## Capítulo 1

### PRESUPUESTO GENERAL

#### 1.1 Introducción

En este capítulo se va a calcular el coste total que ha supuesto el montaje y puesta en marcha de la instalación. Para ello, se han calculado por separado los costes del personal, el coste de los recursos que ya disponía el departamento de inyección, el coste de los recursos y el material fungible. Al final del documento se recoge un resumen del presupuesto total.

Para el cálculo de los recursos que se han empleado y que el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos ya disponía, no se ha tenido en cuenta su coste de mercado sino el coste en función de la amortización aplicable. Asimismo, tampoco se tendrán en cuenta en los cálculos los elementos que forman parte del laboratorio como son la red de suministro de agua o aire comprimido, la climatización o las conexiones eléctricas.

#### 1.2 Cálculo de los costes

##### 1.2.1 Coste de la mano de obra

La mano de obra empleada ha sido de un Catedrático de Universidad, un técnico de laboratorio, un ingeniero electrónico, un tornero y un alumno. Puesto que este Trabajo de Final de Grado supone 12 créditos ECTS, y que cada uno de estos créditos equivale a alrededor de 25 horas, esto supone unas 300 horas por parte del alumno, sin embargo se han realizado unas 360 horas.

A continuación, se detallan las tareas llevadas a cabo por cada uno de ellos:

- Alumno: diseño previo de la instalación, montaje y puesta en marcha del sistema para comprobar el correcto funcionamiento.
- Técnico de laboratorio: ayuda en el montaje y supervisión durante el proceso.
- Ingeniero electrónico: fabricación de una placa base para el control electrónico de la instalación siguiendo el código técnico.
- Catedrático de Universidad: dirigir, supervisar y corregir el trabajo del alumno.
- Tornero: mecanizado de las piezas diseñadas.

En la Tabla 1.1 se recoge el coste de cada uno de ellos.

Coste de la mano de obra empleada					
Ref	Descripción	Ud.	Cantidad	Precio (€/Ud.)	Importe (€)
1.1	Técnico de laboratorio	h	80	22,33	1786,40
1.2	Alumno	h	360	12,40	4464,00
1.3	Profesor de Universidad	h	10	34,20	342,00
1.4	Ingeniero electrónico	h	10	22,33	223,30
1.5	Tornero	h	5	22,33	111,65
<b>Total</b>					<b>6927,35 €</b>

Tabla 1. 1: Cálculo del coste de la mano de obra empleada

### 1.2.2 Coste de los equipos

En este apartado se recogen todos los elementos que pertenecen al Centro de Motores y que son amortizables. La instalación, una vez finalizado el montaje y puesta en marcha por primera vez, ha estado funcionando 15 días durante 4 horas diarias, lo que equivale a unas 60 horas.

Estos equipos son los siguientes:

- **Bomba neumática de alta presión.**
- **Depósito de alta presión.**
- **Carrito de la instalación:** de los elementos que componen el carro, el CMT ya disponía del manómetro, los termopares y los sensores de presión.
- **Equipo de termorregulación:** formado por el termorregulador, la nevera y el depósito de etilenglicol. Empleado para refrigerar los inyectores.
- **Otros:** como mangueras, tuberías de poliuretano, tornillos, tuercas, herramientas, etc. (5%)

Se ha supuesto fuera del presupuesto el raíl y los inyectores ya que son elementos que aporta la empresa interesada en realizar los ensayos de sus productos.

Coste de los equipos empleados					
Ref	Descripción	Ud.	Cantidad	Precio (€/Ud.)	Importe (€)
2.1	HPNP-40/4E/SE Nova Swiss	h	60	0,94	56,4
2.2	Depósito de AP	h	60	0,86	51,6
2.2	Carrito de la instalación	h	60	0,26	15,60
2.3	Equipo de termorregulación	h	60	0,11	6,6
2.5	Otros	h	1	3,93	3,93
<b>Total</b>					<b>134,13 €</b>

Tabla 1. 2: Cálculo del coste de los equipos empleados.

### 1.2.3 Coste del material

Aquí se define el coste de los materiales que el CMT ha comprado para la realización de este trabajo. Cabe destacar que algunos elementos fueron comprados y sustituidos durante su montaje ya que no eran adecuados o presentaban problemas una vez instalados.

Coste del material adquirido					
Ref.	Descripción	Ud.	Cantidad	Precio (€/Ud.)	Importe (€)
3.1	Depósito de baja presión*	-	1	808,44	808,44
3.2	Bomba de BP Flojet	-	1	250,00	250,00
3.3	Filtro Combustible Mahler	-	1	6,70	6,70
3.4	Presostato DSSG-2 INPRO	-	1	88,21	88,21
3.5	Presostato RP2N BAUMER	-	1	160,60	160,60
3.6	Válvula Seguridad 6 O.D + Viton	-	1	101,72	101,72
3.7	Vaso de expansión 5lts. 10kg/cm	-	1	44,15	44,15
3.8	Válvula manoreductora Aignep	-	1	145,23	145,23
3.9	Electroválvula Lucifer y componentes	-	1	540,69	540,69
3.10	Válvula MicroMetering	-	1	48,46	48,46
3.11	Válvula de seguridad del depósito AP	-	1	40,69	40,69
3.12	Estructura de aluminio*	-	1	231,49	231,49

3.13	Tubos flexibles de poliuretano	mts.	1,5	203,89	305,84
3.14	Líneas rígidas de acero	Mts.	2,5	2,60	6,5
3.15	Manómetro	-	1	14,80	14,80
3.16	Caja de alimentación + componentes	-	1	250,65	250,65
3.17	Línea de portes**	-	4	10,00	40,00
				<b>Total</b>	<b>3084,17 €</b>

Tabla 1. 3: Cálculo del coste del material adquirido.

\* El coste detallado está recogido en los siguientes subapartados.

\*\* Puesto que cada uno de los elementos ha sido comprado a empresas distintas, cada pedido tiene una línea de porte distinto. Se ha considerado 4 portes a una media de 10€ cada uno.

### 1.2.3.1 Coste de la estructura de aluminio

El carrito sobre el que se ha montado la bomba neumática de alta presión *Nova Swiss* ha sido construido a partir de perfiles de aluminio anodizado natural de la empresa *FASTEN SISTEMAS*. En el documento IV se muestra su diseño.

Coste de la estructura de aluminio					
Ref.	Descripción	Ud.	Cantidad	Precio (€/Ud.)	Importe (€)
3.13.1	Perfil básico 45x45 aluminio anodizado natural	mts	6,82	12,11	80,17
3.13.2	Perfil básico 45x90 aluminio anodizado natural 1x 600mm	mts	0,63	25,65	16,16
3.13.3	Escuadra aluminio fundido 42x42x42	-	26	1,56	50,56
3.13.4	Conjunto tornillo cabeza martillo 8.8 M8x25 + tuerca M8	-	104	0,35	36,4
3.13.5	Ángulo de triple unión 45	-	4	3,38	13,52
3.13.6	Tapeta redonda ángulo de triple unión 45	-	4	1,98	7,92
3.13.7	Ruedas pequeñas antideslizantes	-	6	4,96	29,76
				<b>Total</b>	<b>231,49 €</b>

Tabla 1. 4: Cálculo del coste de la estructura de aluminio.

### 1.2.3.2 Coste del depósito de combustible de baja presión

Dentro del coste del depósito se ha incluido también el coste del intercambiador de calor.

Coste del depósito de baja presión					
Ref.	Descripción	Ud.	Cantidad	Precio (€/Ud.)	Importe (€)
3.14.1	Tapa inferior		1	88,95	88,95
3.14.2	Tapa superior		1	105,25	105,25
3.14.3	Racor ¼ Termopar 1.5mm	-	1	2,95	2,95
3.14.4	Conexión CSLA 10M-6G	-	3	4,35	13,05
3.14.5	Conexión CB-10M + CAL-10M	-	2	4,09	8,18
3.15.6	Serpentín tubo	mts.	12	575,20	575,20
3.15.7	Ruedas pequeñas antideslizantes	-	3	4,96	14,88
				<b>Total</b>	<b>808,44 €</b>

Tabla 1. 5: Cálculo del coste del depósito de baja presión.

### 1.2.4 Coste del material fungible

Como se ha comentado en el apartado 1.2.2, la instalación ha estado funcionando unas 60 horas, durante las cuales se ha estado consumiendo combustible Diesel, nitrógeno y electricidad. Los costes de estos elementos se han calculado a partir del precio actual de mercado, ya que estos pueden variar en función de diversos factores.

Para el cálculo del consumo de electricidad se ha considerado, tanto la iluminación del laboratorio durante la realización de los ensayos que se han llevado a cabo usando la instalación experimental, como la energía consumida por los equipos que componen la instalación, como son, principalmente: el presostato y las bombas. Estos datos se recogen a continuación.

Coste del material fungible					
Ref.	Descripción	Ud.	Cantidad	Precio (€/Ud.)	Importe (€)
4.1	Electricidad	Kwh	494,4	0,11	54,38
4.2	Nitrógeno	-	0,03	52,51	1,54
4.3	Diesel	l	20	1,065	21,3
<b>Total</b>					<b>77,22 €</b>

Tabla 1. 6: Cálculo del coste del material fungible

### 1.2.5 Coste total

En la Tabla 1.7 se muestra un resumen del coste total del proyecto, en la cual se han añadido los gastos generales, el beneficio industrial y el IVA.

Descripción	Importe
Coste mano de obra	6927,35 €
Coste de los equipos	134,13 €
Coste de materiales	3084,06 €
Coste de materiales fungibles	77,22 €
Presupuesto de ejecución material	10219,76 €
Gastos generales (13%)	1328,57 €
Beneficio Industrial (6%)	613,19 €
Presupuesto de ejecución	12161,52 €
IVA (21%)	2553,92 €
Presupuesto total	<b>14715,44 €</b>

Tabla 1. 7: Resumen del coste total del proyecto.

Finalmente, el coste total de este Trabajo de Final de Grado asciende a la cantidad de CATORCE MIL SETECIENTOS QUINCE EUROS CON CUARENTA Y CUATRO CÉNTIMOS.

### 1.3 Método de cálculo

#### 1.3.1 Método de cálculo para los costes de mano de obra

Los datos han sido sacados del manual de procedimiento para la contratación de personal del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos (DMMT), que ha sido proporcionado por el jefe de Recursos Humanos del CMT. Del cual hemos obtenido la siguiente información:

- **Técnico de laboratorio e ingeniero eléctrico:**

- Horas trabajadas en un año:

$$\left[ 365 \text{ días/año} - (2x(52 - 4) + 15) \text{ festivos/año} - 30 \text{ vacaciones/año} \right] \times 8 \text{ horas/día} = 1792 \text{ horas/año}$$

- Salario anual: **30094,4 €/año**

- Salario bruto anual: **40025,55 €/año**

- Seguridad social (33%): **9931,15€**

- Coste horario: **22,33 €/hora**

Para el alumno y el Catedrático de la Universidad se ha seguido exactamente la misma metodología de cálculo obteniéndose un coste unitario de 12,4 y 34,2 €/hora, respectivamente.

#### 1.3.2 Método de cálculo para los costes de los equipos

Se tendrá en cuenta su precio actual de mercado y se calculará a partir del precio de compra su amortización. También se tendrá en cuenta el coste de mantenimiento.

- Amortización constante: este procedimiento tiene en cuenta la depreciación lineal del elemento en el curso de su vida útil o durante el período de amortización que se ha tenido en cuenta. Su expresión es la siguiente:

$$\alpha = (V_C - V_R)/n \quad (1.1)$$

Siendo:

$\alpha$ : amortización (€/año).

$V_R$ : valor residual (actual) (€).

$V_C$ : valor de la compra (€).

$n$ : período de amortización (años).

- Tasa horaria: hace referencia a la explotación del equipo o grupo de ellos y se divide entre el tiempo de utilización.

$$T_H = (\alpha + m)/h \quad (1.2)$$

Siendo:

$T_H$ : tasa horaria (€/hora).

$m$ : mantenimiento (€/año).

$h$ : horas trabajadas (horas/año).

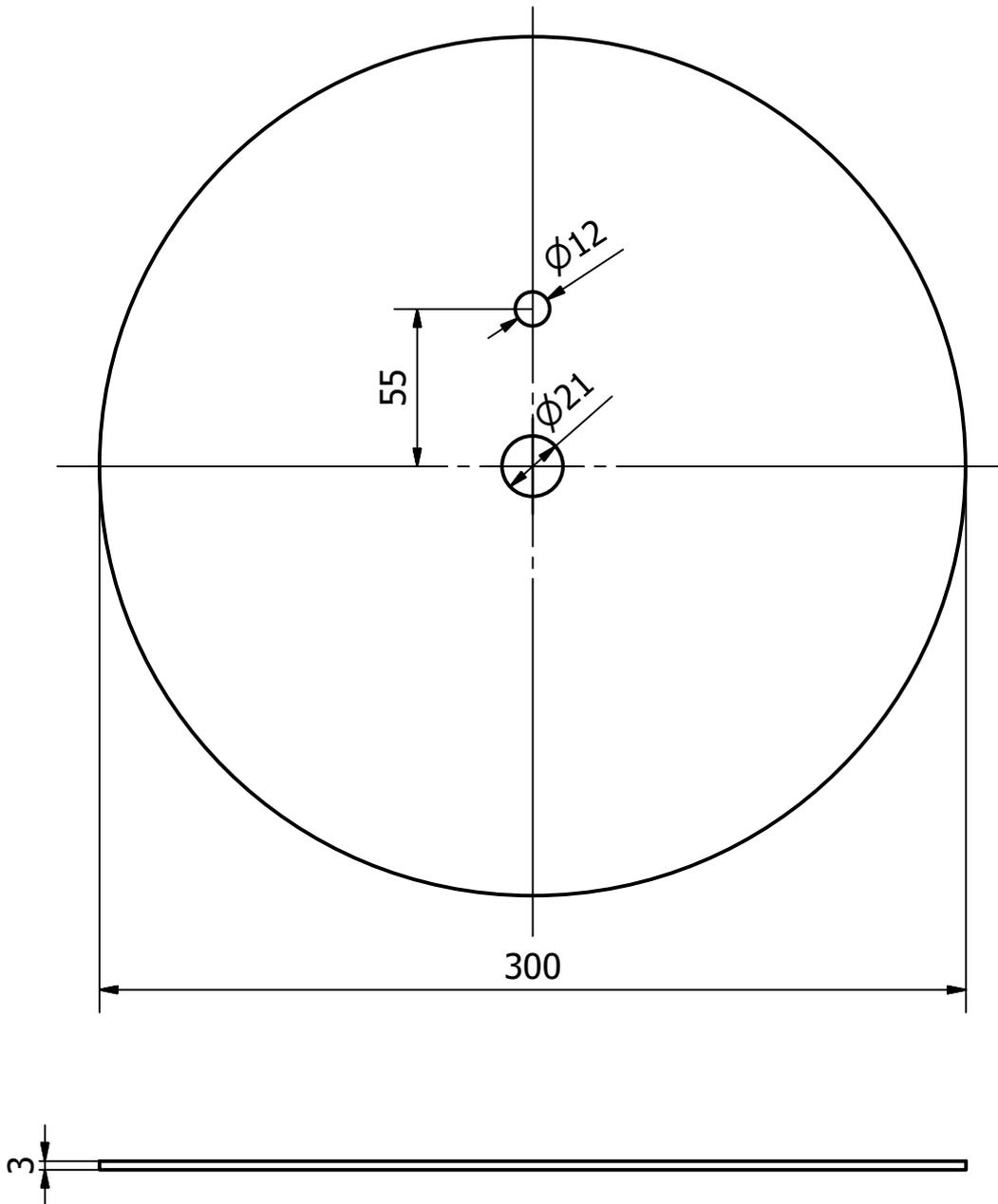
Descripción	$V_C$ (€)	$V_R$ (€)	$n$ (años)	$\alpha$ (€/año)	$m$ (€/año)	$T_H$ (€/hora)
HPNP-40/4E/SE Nova Swiss	11976,03	9000,00	5	595,21	160,00	0,9445
Depósito de AP	7991,75	5500,00	5	498,35	200,00	0,8616
Carrito de la instalación	480,00	220,00	5	52,00	0	0,2600
Equipo de termoregulación	1800,00	1450,00	10	35,00	55,00	0,106



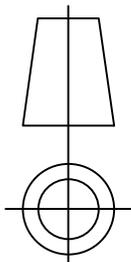
**Documento IV**

**Planos**





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Tipo de documento:  
Plano de pieza

Si no se especifica lo  
contrario:  
Unidades en: mm  
Acabado superficial:  
N9

Creado por:  
Laura Bondia Romero

Fecha:  
22/05/2017

Aprobado por:  
Jose Enrique del Rey García

Fecha:  
22/05/2017

Descripción:

Tapa superior del depósito de baja  
presión.

Acabado:

Línea de inyección

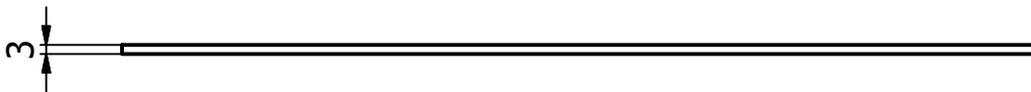
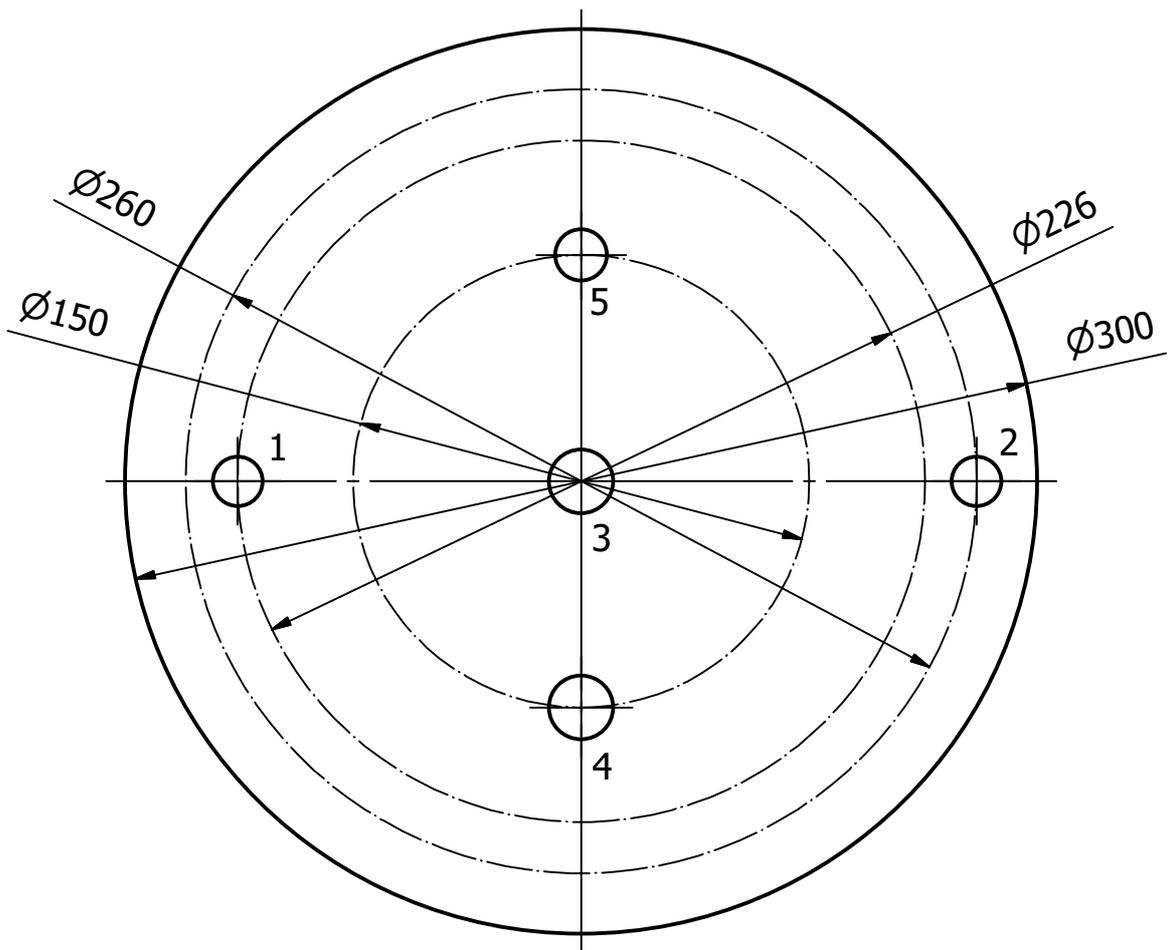
Material:  
Acero inoxidable 304

Referencia:

Revisión:

Hoja:  
1/2

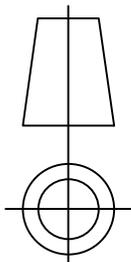
A4 Escala: 2:5



Agujero	Tamaño
1	Ø16,3
2	Ø16,3
3	Ø21
4	Ø21
5	Ø17



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Tipo de documento:  
Plano de pieza

Si no se especifica lo  
contrario:  
Unidades en: mm  
Acabado superficial:  
N9

Creado por:  
Laura Bondia Romero

Fecha:  
22/05/2017

Aprobado por:  
Jose Enrique del Rey García

Fecha:  
22/05/2017

Descripción:

Tapa inferior del depósito de baja  
presión.

Acabado:

Línea de inyección

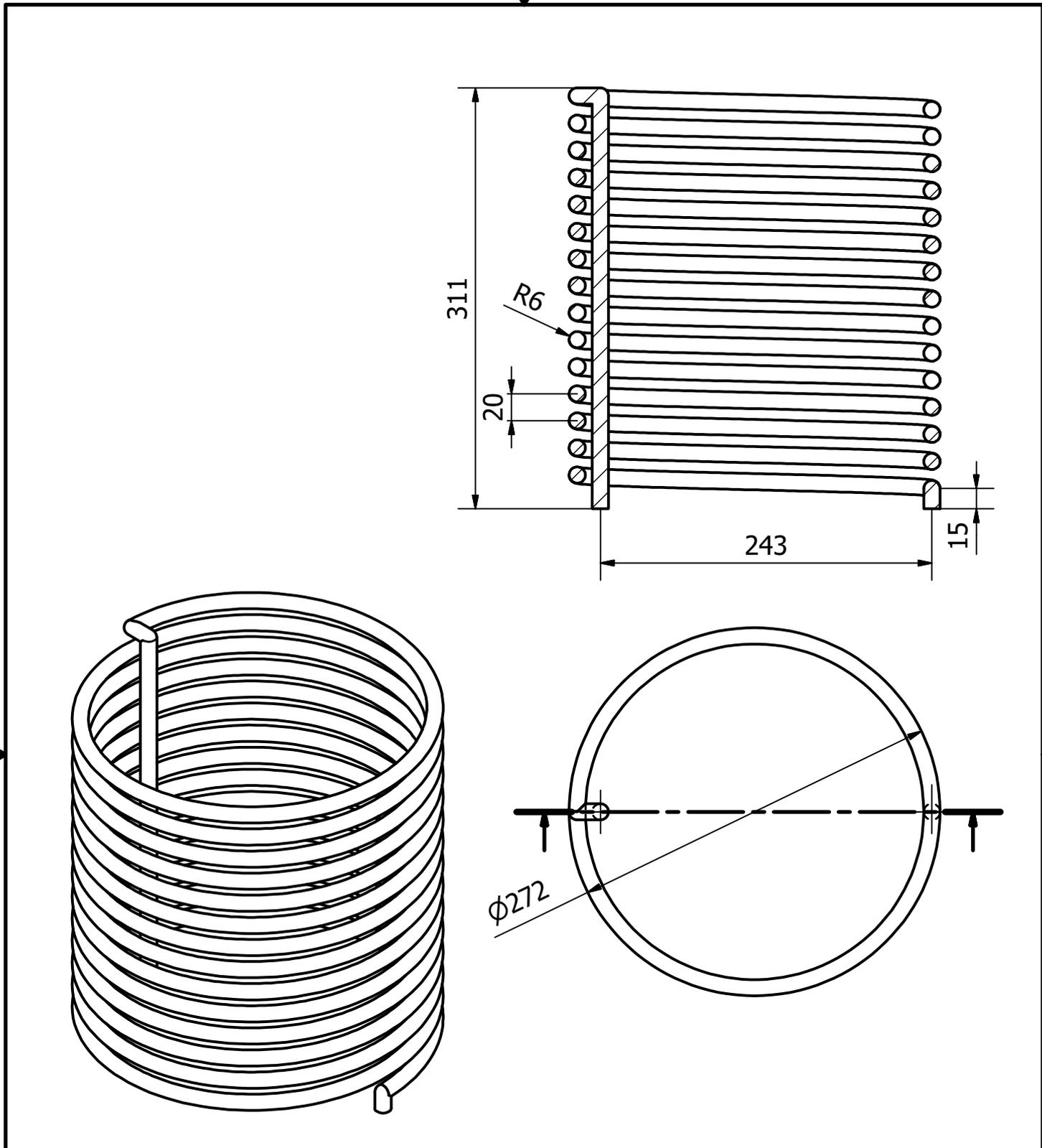
Material:  
Acero inoxidable 304

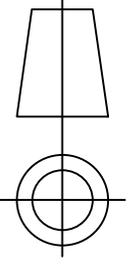
Referencia:

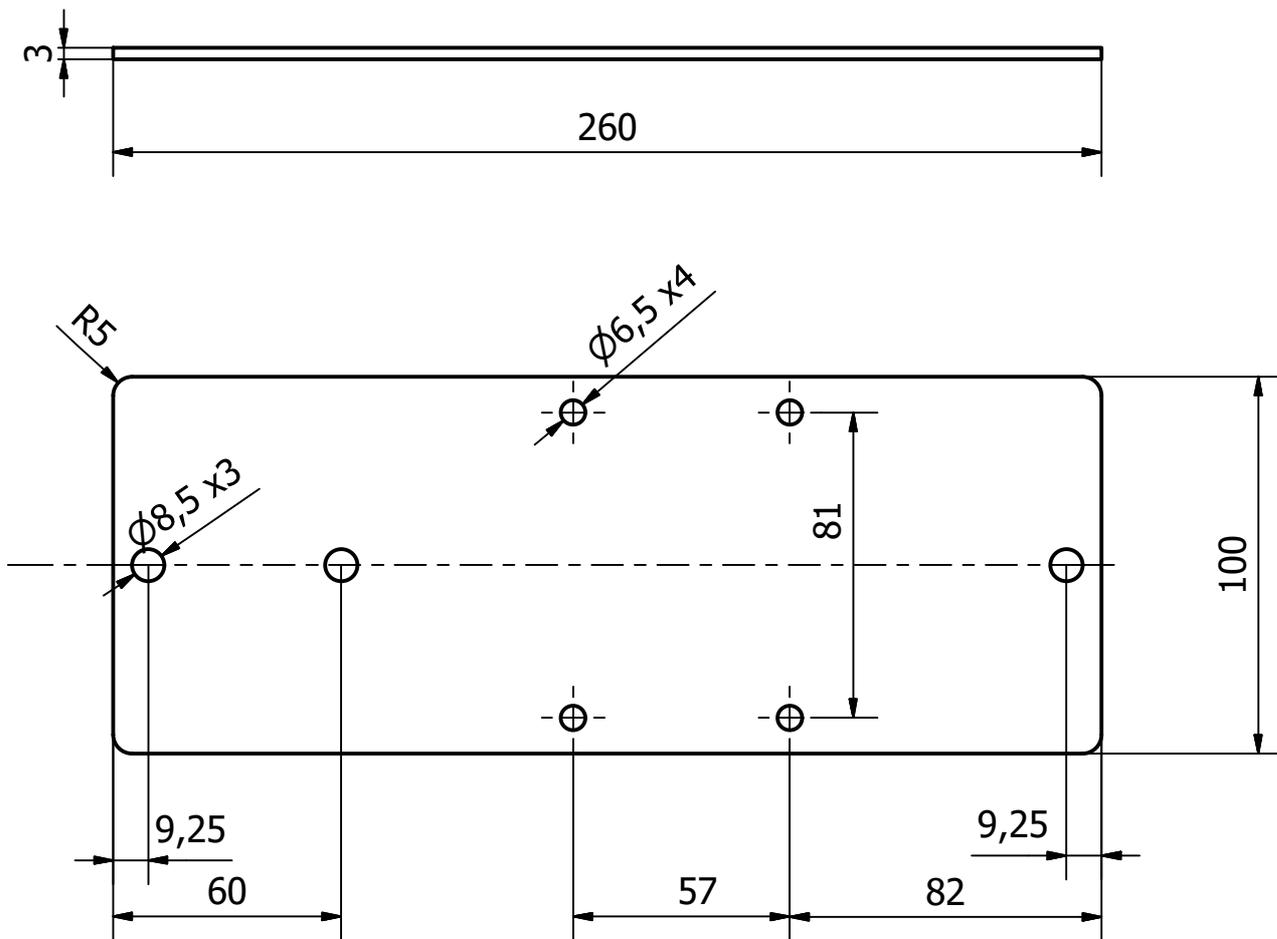
Revisión:

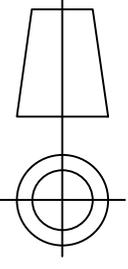
Hoja:  
2/2

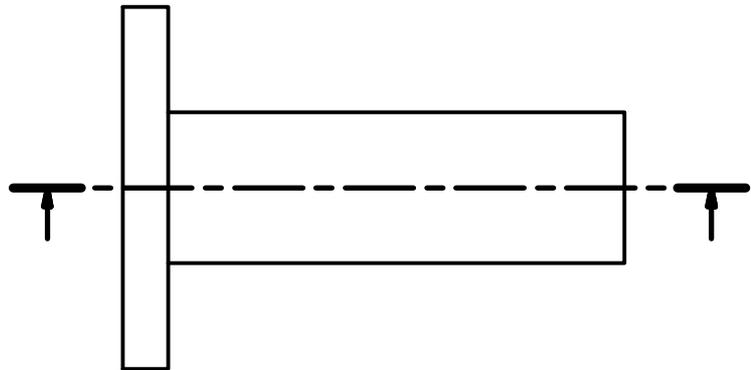
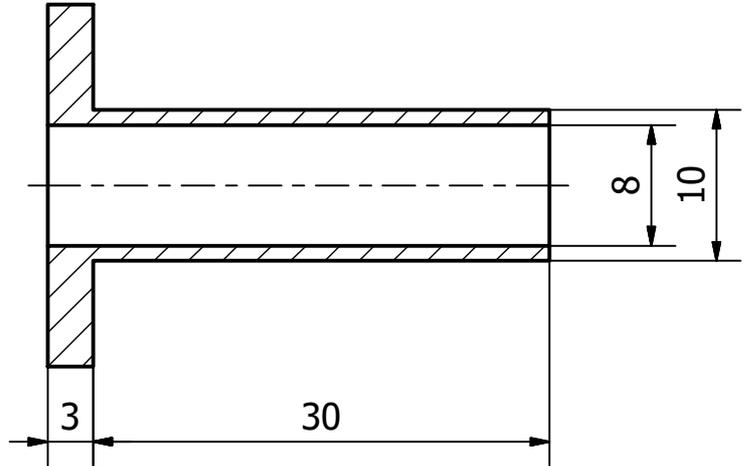
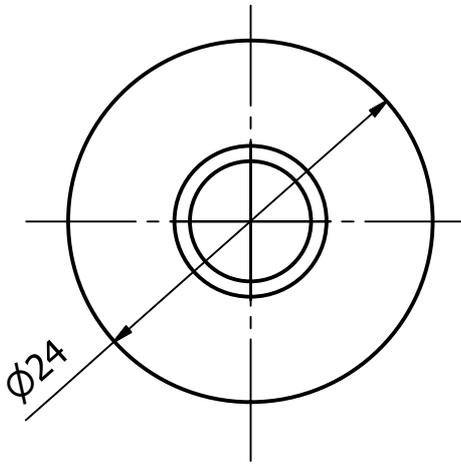
A4 Escala: 2:5



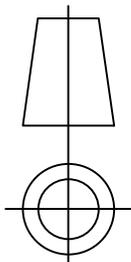
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		Tipo de documento: Plano de pieza		Creado por: Laura Bondia Romero		Fecha: 22/05/2017	
		Si no se especifica lo contrario: Unidades en: mm Acabado superficial: N9		Aprobado por: Jose Enrique del Rey García		Fecha: 22/05/2017	
		Acabado:		Descripción: Serpentín para el intercambiador de calor			
Línea de inyección		Material: Acero inoxidable 304		Referencia:		Revisión:	Hoja: 1/1
A4      Escala: 1:4							



 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		Tipo de documento: <b>Plano de pieza</b>		Creado por: <b>Laura Bondia Romero</b>		Fecha: <b>23/05/2017</b>	
		Si no se especifica lo contrario: Unidades en: mm Acabado superficial: N9		Aprobado por: <b>Jose Enrique del Rey García</b>		Fecha: <b>23/05/2017</b>	
		Acabado:		Descripción: <b>Soporte para la bomba de baja presión</b>			
Línea de inyección		Material: <b>Acero inoxidable 304</b>		Referencia:		Revisión:	
<b>A4</b> Escala: 1:2						Hoja: <b>1/1</b>	



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Tipo de documento:  
Plano de pieza

Si no se especifica lo  
contrario:  
Unidades en: mm  
Acabado superficial:  
N9

Creado por:  
Laura Bondia Romero

Fecha:  
15/06/2017

Aprobado por:  
Jose Enrique del Rey García

Fecha:  
15/06/2017

Descripción:

Llave para la válvula de cierre en el vaso  
expansor

Acabado:

Línea de inyección

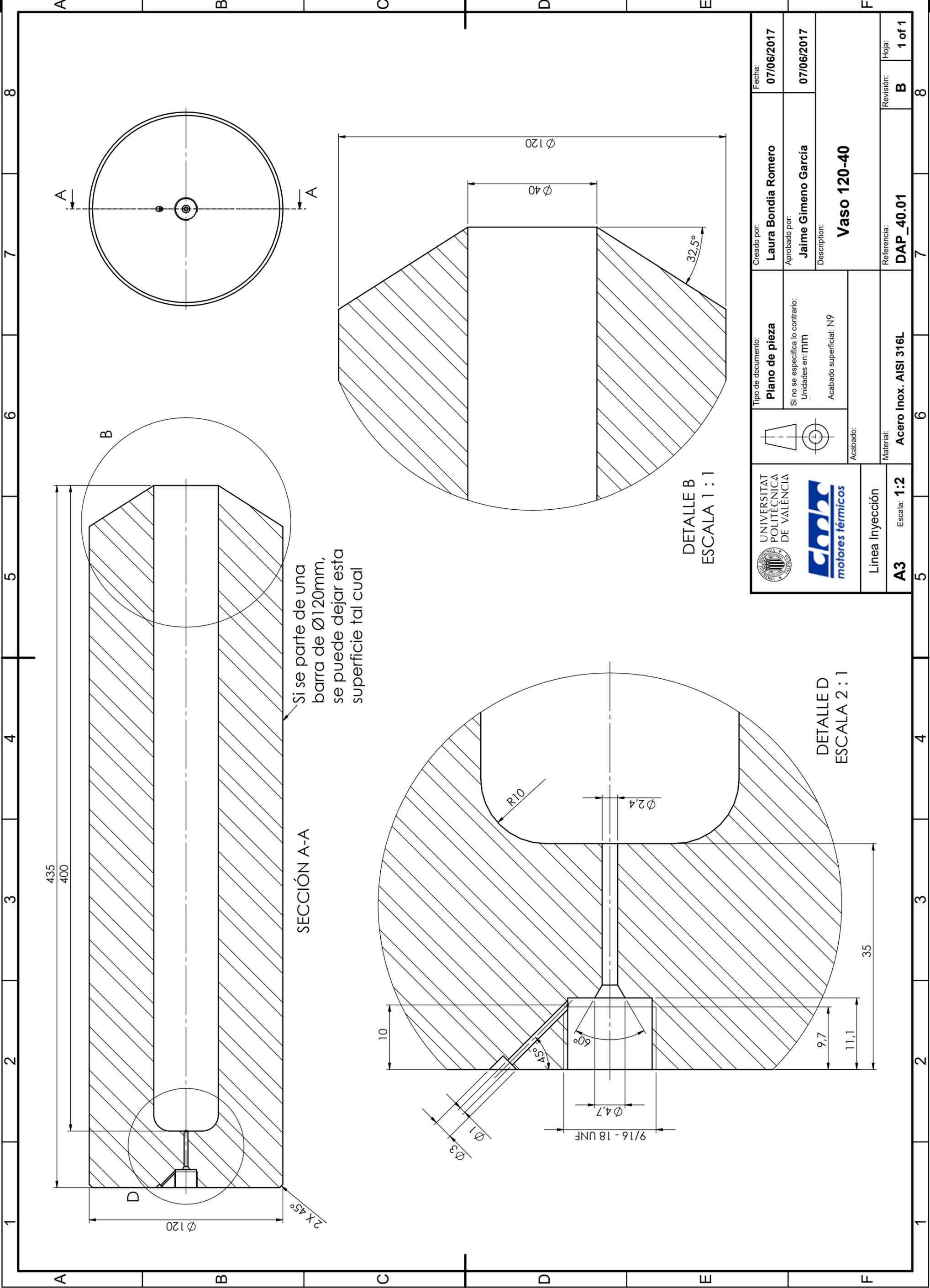
Material:  
Acero inoxidable 304

Referencia:

Revisión:

Hoja:  
1/1

A4 Escala: 2:1

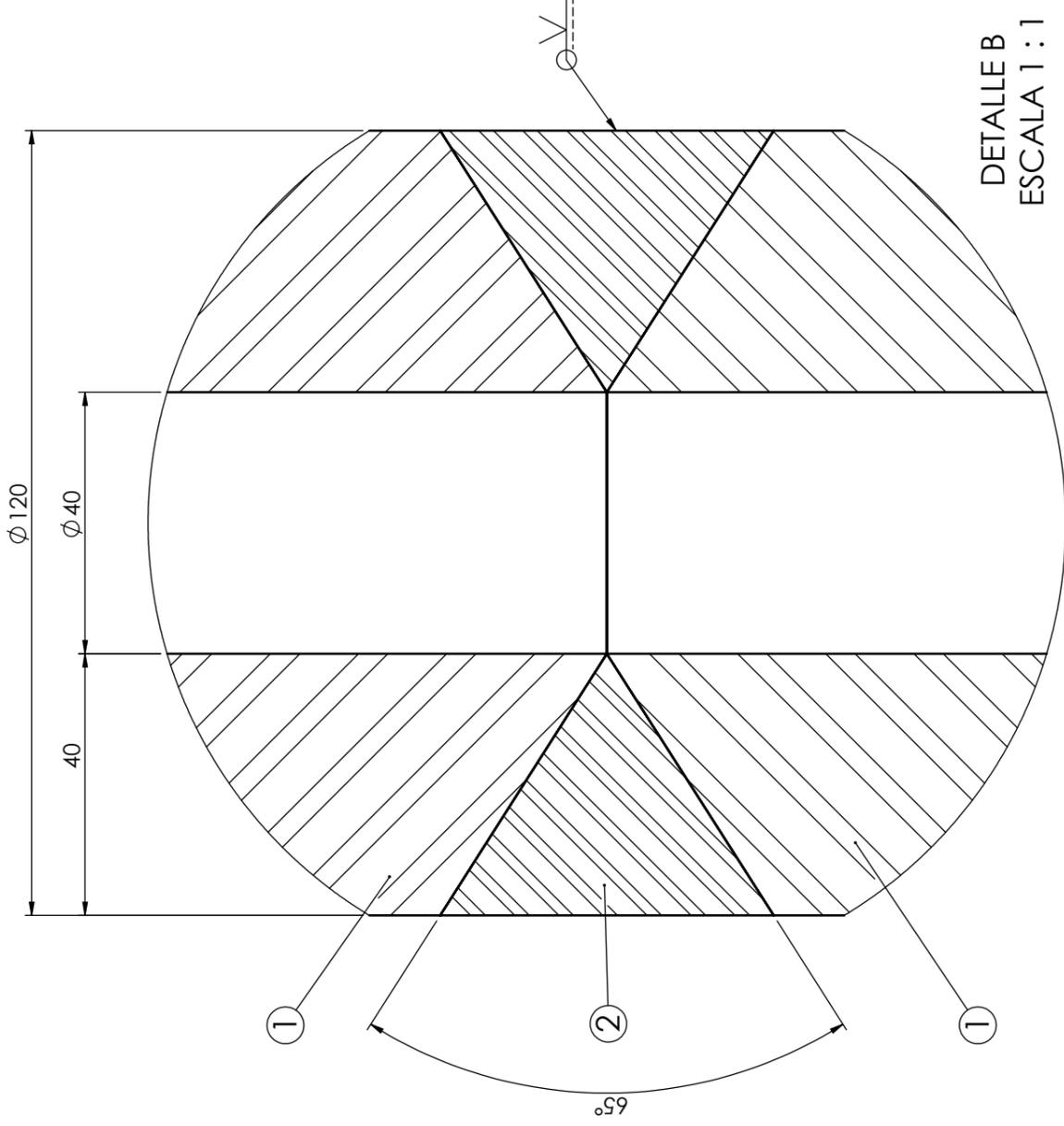
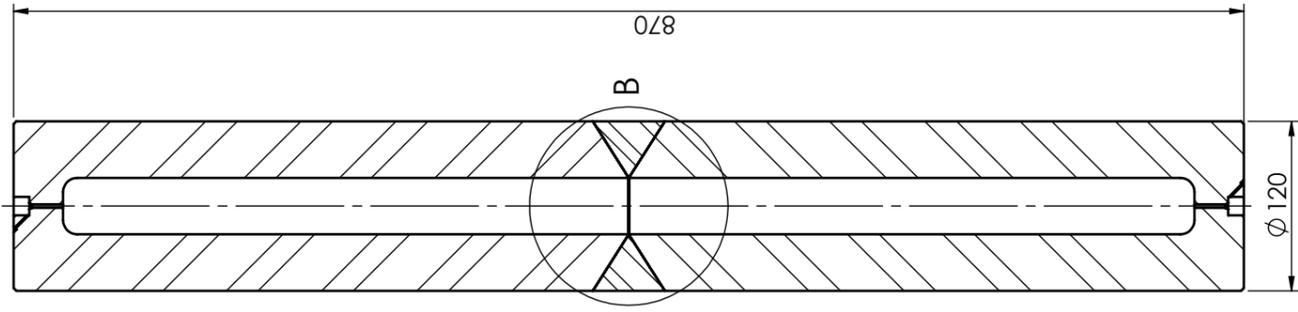
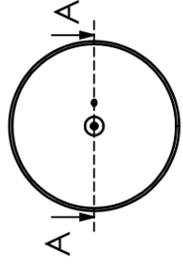


Si se parte de una barra de Ø120mm, se puede dejar esta superficie tal cual

DETALLE B  
ESCALA 1 : 1

DETALLE D  
ESCALA 2 : 1

	Tipo de documento: <b>Plano de pieza</b>	Creado por: <b>Laura Bondia Romero</b>	Fecha: <b>07/06/2017</b>
	Si no se especifica lo contrario: Unidades en: mm Acabado superficial: N9	Aprobado por: <b>Jaime Gimeno García</b>	Descripción: <b>Vaso 120-40</b>
Acabado: Material: <b>Acero Inox. AISI 316L</b>	Línea Inyección <b>A3</b>	Referencia: <b>DAP_40.01</b>	Revisión: <b>B</b>
Escala: <b>1:2</b>	Hoja: <b>1 of 1</b>		



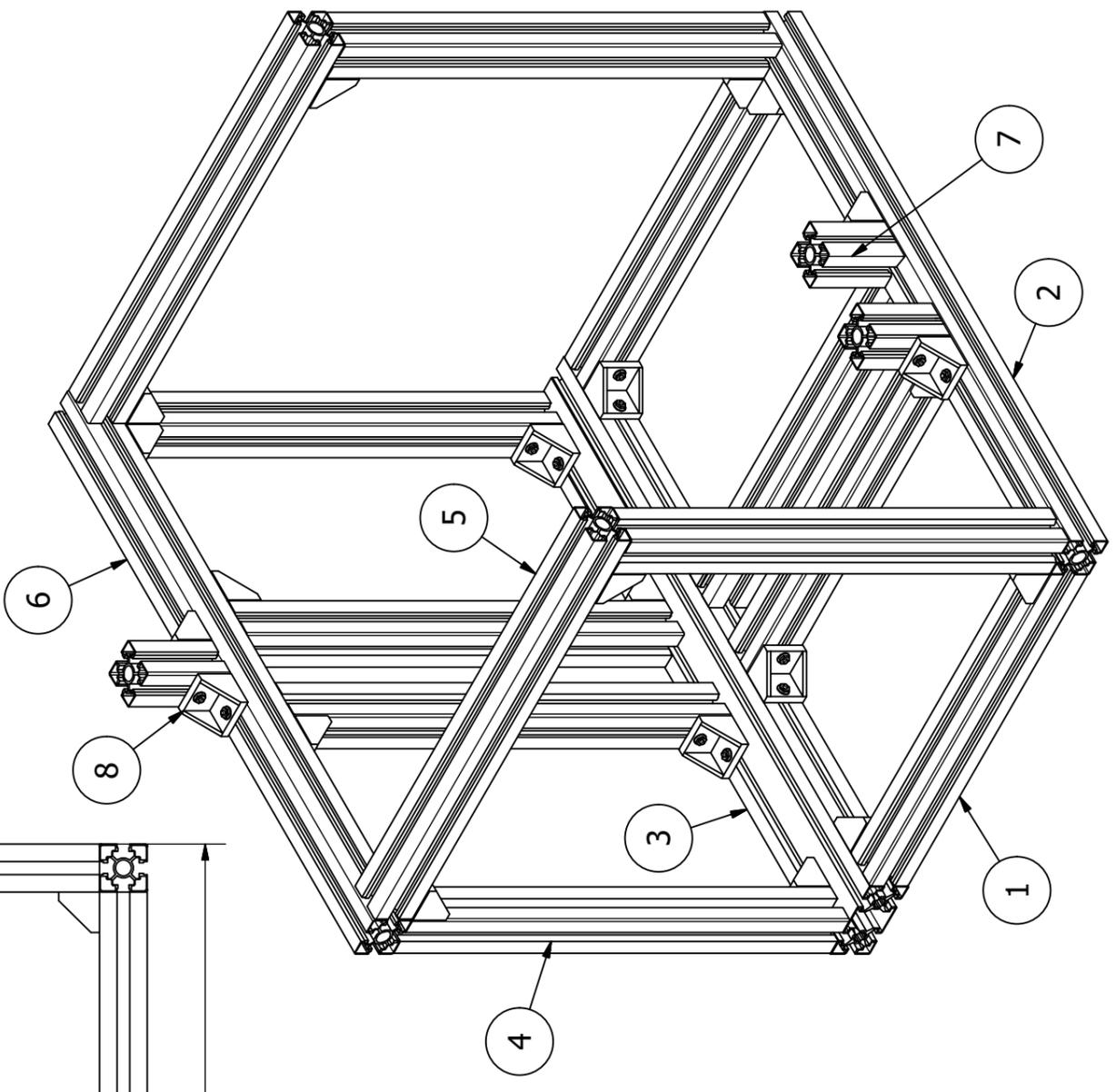
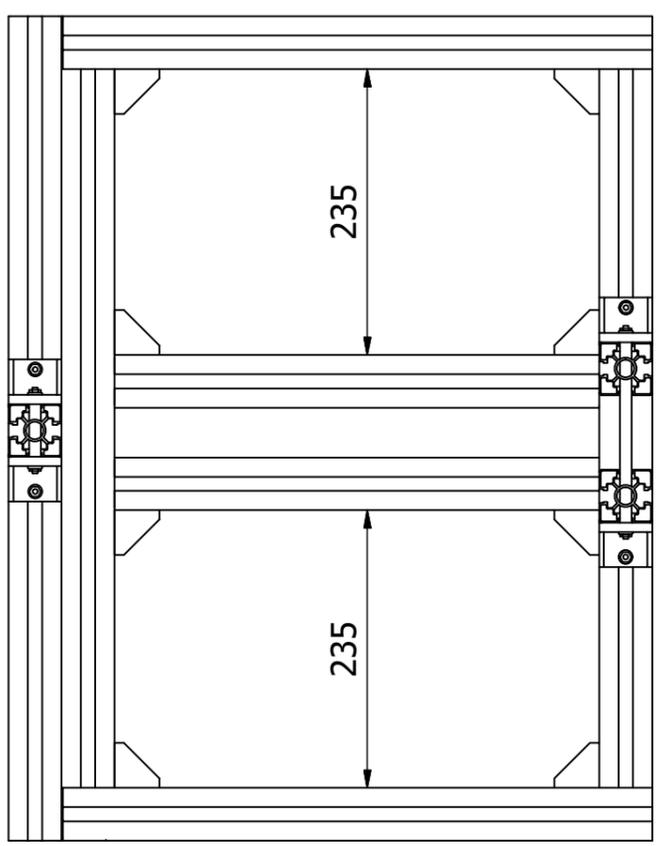
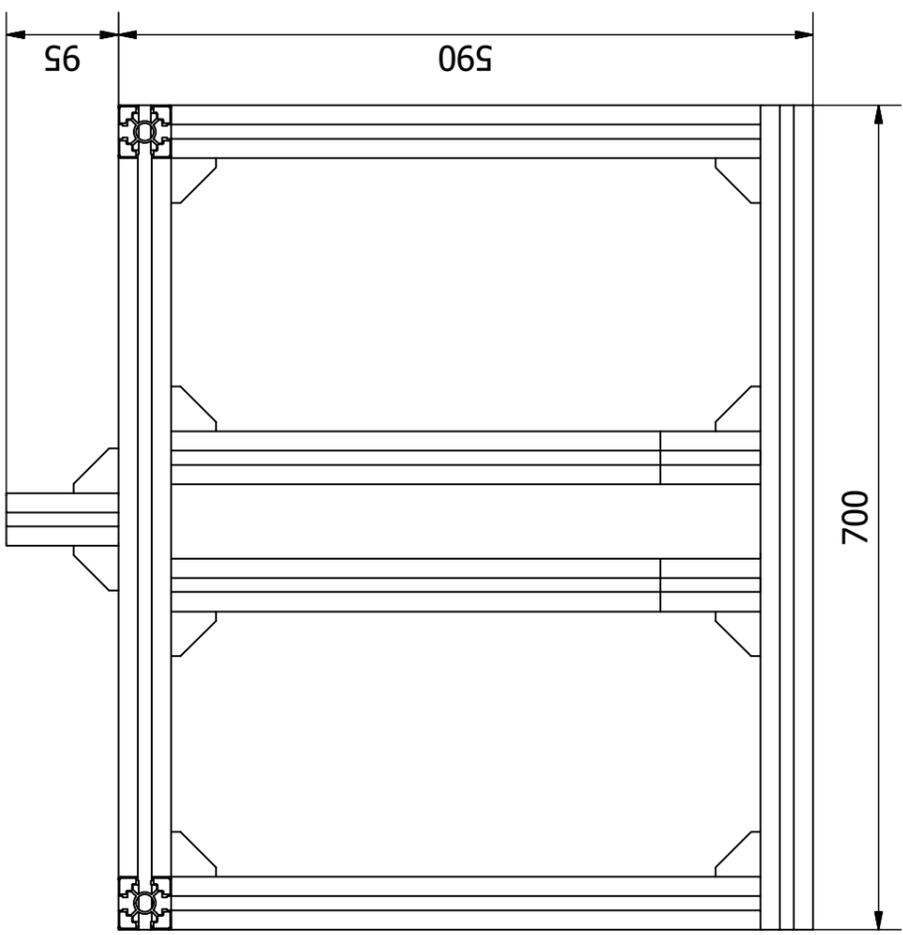
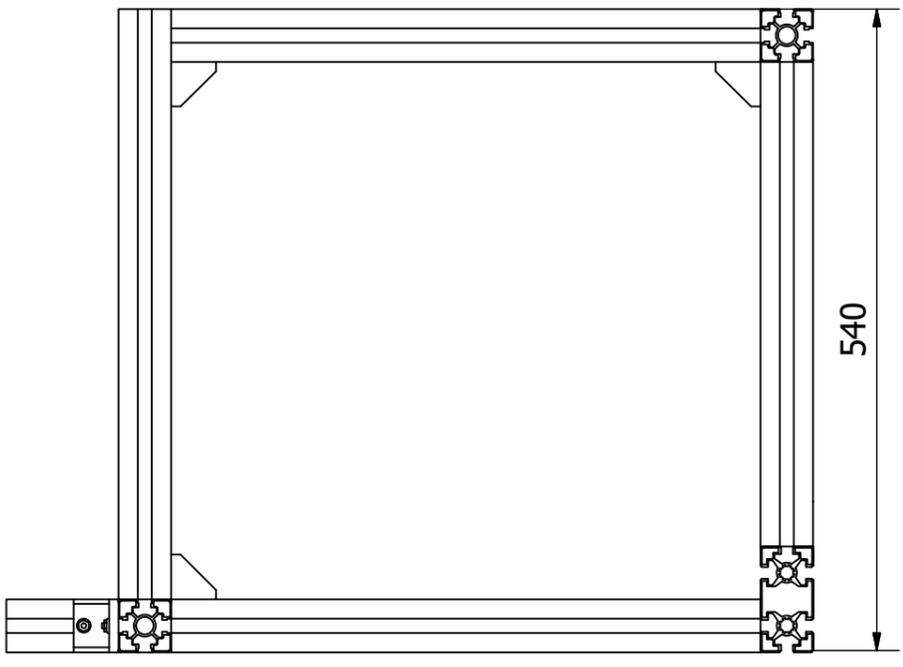
DETALLE B  
ESCALA 1 : 1

SECCIÓN A-A

N.º	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANTIDAD
2		Soldadura		1
1	DAP_40.01	Vaso 120-40	Acero Inox. AISI 316L	2

	Tipo de documento: <b>Plano de conjunto</b>	Creado por: <b>Laura Bondia Romero</b>	Fecha: <b>07/06/2017</b>
	Si no se especifica lo contrario: Unidades en: mm	Aprobado por: <b>Jaime Gimeno Garcia</b>	Fecha: <b>07/06/2017</b>
Acabado superficial: N9	Descripción: <b>Conjunto 120.40</b>		
Linea Inyección <b>A3</b>	Material: <b>DAP_40.00</b>	Referencia: <b>DAP_40.00</b>	Hoja: <b>1 of 1</b>

**Descripción:** Estructura de perfiles FASTEN  
**Fecha:** 22/02/2017  
**Tipo de documento:** Plano de conjunto  
**Si no se especifica lo contrario:** Unidades en mm  
**Material:** Aluminio anodizado  
**Creado por:** Laura Bondia Romero  
**Aprobado:** Jose Enrique del Rey García  
**Línea de inyección**  
**A3** Escala: 1:6



Pieza	Cant.	Descripción
1	4	Perfiles 45x45 inferiores 400 mm
2	1	Perfil 45x45 inferior 700 mm
3	1	Perfil 45x95 inferior 700 mm
4	6	Perfiles 45x45 verticales 500 mm
5	2	Perfiles 45x45 superiores 445 mm
6	1	Perfil 45x45 superior 700 mm
7	3	Perfiles 45x45 95 mm
8	26	Anclajes