



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Curso Académico:

AGRAÏMENTS

“A la meua família, per donar-me l’oportunitat de poder estudiar a la universitat, que tal com estan les coses no és poc. He aconseguit sobreviure aquests quatre anys gràcies a les maletes plenes de tàpers de ma mare, als incomptables kilòmetres recorreguts per mon pare perquè poguera compaginar dos aficions difícilment compaginables, i als consells de “veterano” del meu germà.

Al personal del CMT. A Raül Payri per permetre’m conèixer el departament, a Gabriela per les hores perdudes corregint i introduint-me a poc a poc en el món dels motors, i a Jose Enrique, per totes les historietes i batalletes que tantes vegades ha repetit a altres com jo.

A tots els companys de classe i en especial a Josep, O’Connor i Javi, perquè per damunt dels coneixements adquirits a la carrera em quede amb les amistats.

I, per descomptat, a Carla, perquè durant aquests anys hem passat infinitat de moments que seran per a sempre i perquè m’has ensenyat una lliçó importantíssima, que la vida està per a viure-la.”

RESUMEN

Los motores dual fuel son motores de combustión interna alternativos alimentados principalmente por gas natural, pero cuyo encendido es provocado por una pequeña inyección diesel piloto. Esta tecnología permite, por un lado, aprovechar el elevado rendimiento y las bajas emisiones que presenta la combustión del gas natural y, por otro lado, aumentar la fiabilidad de suministro gracias a la posibilidad de funcionar con cualquiera de los dos combustibles.

El objetivo del presente trabajo es la caracterización de un inyector tipo solenoide para un motor dual fuel. Para ello se ha realizado la medida de la tasa de diesel inyectada por ciclo y cilindro de forma que se analice el comportamiento del inyector en función de los distintos parámetros de operación, como son la presión de inyección, la contrapresión en el cilindro, el tiempo de energización y el tipo de tobera utilizada.

Palabras Clave: gas natural, dual fuel, inyector, tasa, presión de inyección, tobera

RESUM

Els motors dual fuel són motors de combustió interna alternatius alimentats principalment per gas natural, però l'encesa dels quals és provocada per una petita injecció dièsel pilot. Aquesta tecnologia permet, per una banda, aprofitar l'elevat rendiment i les baixes emissions que presenta la combustió del gas natural i, per altra banda, augmentar la fiabilitat de subministrament gràcies a la possibilitat de funcionar amb qualsevol dels dos combustibles.

L'objectiu del present treball és la caracterització d'un inyector tipus solenoide d'un motor dual fuel. Per a això s'ha realitzat la mesura de la taxa de dièsel injectada per cicle i cilindre de forma que s'analitzi el comportament de l'inyector en funció dels diferents paràmetres d'operació, com són la pressió d'injecció, la contrapressió al cilindre, el temps d'energització i el tipus de tovera utilitzada.

Paraules clau: gas natural, dual fuel, inyector, taxa, pressió d'injecció, tovera

ABSTRACT

The dual fuel engines are alternative internal combustion engines fed mainly by natural gas, but whose ignition is caused by a small diesel pilot injection. This technology allows, on one hand, to take advantage of high performance and low emissions having the combustion of the natural gas and, on the other hand, to improve supply reliability due to the possibility of operating with either fuels.

The aim of this work is the characterization of a solenoid injector of a dual fuel engine. Therefore, it has been done the measure of the diesel rate injected per cycle and cylinder in order to analyze the behavior of the injector according to the different parameters of operation, such as injection pressure, backpressure in the cylinder, the energizing time and type of nozzle used.

Keywords: natural gas, dual fuel, injector, rate, injection pressure, nozzle

ÍNDICE GENERAL

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

I. MEMORIA.....	14
II. PRESUPUESTO	73

ÍNDICE DE LA MEMORIA

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO	16
1.1. INTRODUCCIÓN	16
1.2. ANTECEDENTES	17
1.3. OBJETIVOS	18
1.4. JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN	18
1.5. VIABILIDAD	19
1.6. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	19
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	20
2.1. INTRODUCCIÓN	20
2.2. MOTORES DIESEL TIPO MEC.....	20
2.3. MOTORES DE GAS NATURAL TIPO MEP	21
2.4. MOTORES DUAL FUEL	22
2.5. SISTEMA DE INYECCIÓN	25
2.5.1. COMMON-RAIL	26
2.5.2. INYECTOR.....	27
CAPÍTULO 3. INSTALACIONES EXPERIMENTALES	31
3.1. INTRODUCCIÓN	31
3.2. INSTALACIÓN DE TASA DE INYECCIÓN	31
3.2.1. PRINCIPIO DE MEDIDA	32
3.2.2. DESCRIPCIÓN DE LA MAQUETA	33
3.2.2.1. TASÍMETRO	33
3.2.2.2. CIRCUITOS HIDRÁULICO Y ELÉCTRICO	34
3.2.3. ELEMENTOS	35
3.2.3.1. RAÍL.....	35
3.2.3.2. INYECTOR	36
3.2.3.3. FILTRO DE COMBUSTIBLE	37
3.2.3.4. LÍNEAS DE COMBUSTIBLE	38
3.2.3.5. TERMORREGULADOR	38
3.2.3.6. BALANZA DE PRECISIÓN Y SISTEMA DE ASPIRACIÓN	39
3.2.3.7. BOTELLA DE NITRÓGENO	40
3.2.3.8. GENOTEC.....	40
3.2.3.9. GENERADOR DE ONDAS	40
3.2.3.10. PID Y RACK DE TEMPERATURAS	41

3.2.3.11. RACK DEL TASÍMETRO	41
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	43
4.1. INTRODUCCIÓN	43
4.2. SOFTWARE UTILIZADO	43
4.2.1. MAGNETINJEKTOR V2	43
4.2.2. YOKO DL716	44
4.2.3. XBALANCIN	45
4.2.4. XTASUTILES	46
4.2.5. HOJA DE CÁLCULO	47
4.3. PROCEDIMIENTO	47
4.3.1. SEÑAL DE TASA	48
4.4. PLAN DE ENSAYOS	49
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
5.1. INTRODUCCIÓN	53
5.2. SEÑAL DE TASA	53
5.3. INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE INYECCIÓN	54
5.4. INFLUENCIA DE LA CONTRAPRESIÓN EN EL CILINDRO	56
5.5. INFLUENCIA DEL TIEMPO DE ENERGETIZACIÓN	57
5.6. COMPARACIÓN ENTRE TOBERAS	58
5.7. MEDIDA DEL DIÁMETRO REAL EN MICROSCOPIO	61
5.7.1. FOTOGRAFÍAS MEDIANTE MICROSCOPIO LUPA	61
5.7.2. PROCESADO DE LAS IMÁGENES	63
5.7.3. RESULTADOS	65
5.8. CONCLUSIONES	66
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES GENERALES	69
6.1. INTRODUCCIÓN	69
6.2. CONCLUSIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	71

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

CAPÍTULO 1. PRESUPUESTO	75
1.1. INTRODUCCIÓN	75
1.2. CÁLCULO DE COSTES	75
1.2.1. COSTE DE LA MANO DE OBRA	75
1.2.2. COSTE DE LOS EQUIPOS	76
1.2.3. COSTE DEL MATERIAL	77
1.2.4. COSTE DEL MATERIAL FUNGIBLE	78
1.2.5. COSTE TOTAL	79
1.3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO	79
1.3.1. CÁLCULO DEL COSTE DE LA MANO DE OBRA	79
1.3.2. CÁLCULO DEL COSTE DE LOS EQUIPOS	79

ÍNDICE DE FIGURAS DE LA MEMORIA

FIGURA 1. 1. EDIFICIO DEL CMT EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA17

FIGURA 2. 1. ETAPAS DE UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN DE CUATRO TIEMPOS21

FIGURA 2. 2. CÁMARA Y PRECÁMARA DE COMBUSTIÓN DE UN MOTOR DE GAS NATURAL22

FIGURA 2. 3. OPERACIÓN MOTORES DUAL FUEL.....23

FIGURA 2. 4. RATIO DE SUSTITUCIÓN EN FUNCIÓN DE LA CARGA24

FIGURA 2. 5. MOTOR DUAL FUEL CON SISTEMA DE DOBLE INYECTOR25

FIGURA 2. 6. REDUCCIÓN COSTES RESPECTO A MOTORES DIESEL CONVENCIONALES.....25

FIGURA 2. 7. CIRCUITO DE COMBUSTIBLE27

FIGURA 2. 8. INYECTOR DE TIPO SOLENOIDE28

FIGURA 2. 9. DETALLE DE LA VÁLVULA DEL INYECTOR DE TIPO SOLENOIDE28

FIGURA 3. 1. INSTALACIÓN DEL TASÍMETRO32

FIGURA 3. 2. ESQUEMA DEL INTERIOR DEL TASÍMETRO [7].....33

FIGURA 3. 3. ESQUEMA HIDRÁULICO DE LA INSTALACIÓN DE TASA34

FIGURA 3. 4. ESQUEMA ELÉCTRICO DE LA INSTALACIÓN DE TASA.....35

FIGURA 3. 5. RAÍL.....36

FIGURA 3. 6. INYECTOR.....36

FIGURA 3. 7. ESQUEMA DEL MONTAJE DEL INYECTOR37

FIGURA 3. 8. FILTRO DE COMBUSTIBLE37

FIGURA 3. 9. TIPOS DE LÍNEAS DE COMBUSTIBLE38

FIGURA 3. 10. TERMORREGULADOR (IZQUIERDA) Y PORTAINYECTOR REFRIGERADO (DERECHA)39

FIGURA 3. 11. BALANZA, VASO Y SISTEMA DE ASPIRACIÓN.....39

FIGURA 3. 12. GENOTEC40

FIGURA 3. 13. GENERADOR DE ONDAS41

FIGURA 3. 14. PID Y RACK DE TEMPERATURAS.....41

FIGURA 4. 1.. SEÑAL DE PULSO ENVIADA AL GENOTEC [8]44

FIGURA 4. 2. INTERFAZ DE LA VENTANA DE PULSOS DEL SOFTWARE MAGNETINJEKTORV2.....44

FIGURA 4. 3. INTERFAZ DEL SOFTWARE YOKO45

FIGURA 4. 4. INTERFAZ DEL SOFTWARE *XBALANCIN*46

FIGURA 4. 5. INTERFAZ DEL SOFTWARE *XTASUTILES*46

FIGURA 4. 6. GRAFICACIÓN DATOS DE TASA47

FIGURA 4. 7. GRÁFICO DE LAS 50 SEÑALES DE TASA49

FIGURA 4. 8. GRÁFICO DEL PROMEDIO DE LAS 50 SEÑALES DE TASA49

FIGURA 4. 9. FOTOGRAFÍAS DE LA TOBERA A (IZQUIERDA) Y B (DERECHA)50

FIGURA 5. 1. MEDIDA DE TASA DE LA TOBERA B PARA PINY=1000 BAR, CP=60 BAR, ET=2520 MS53

FIGURA 5. 2. COMPARACIÓN TASA INYECTADA EN LA TOBERA A PARA CP=60 BAR, ET=460 MS, Y
PINY=800,1000,1200 BAR.....55

FIGURA 5. 3. COMPARACIÓN TASA INYECTADA EN LA TOBERA A PARA PINY=800 BAR, ET=880 MS, Y
CP=1,100 BAR56

FIGURA 5. 4. COMPARACIÓN TASA INYECTADA EN LA TOBERA B PARA PINY=600 BAR, ET=850 MS, Y
CP=80,100,120 BAR.....56

FIGURA 5. 5. COMPARACIÓN TASA INYECTADA EN LA TOBERA A PARA PINY=1000 BAR Y CP=60 BAR ANTE DISTINTOS TIEMPOS DE ENERGETIZACIÓN.....	57
FIGURA 5. 6. COMPARACIÓN TASA INYECTADA EN LA TOBERA B PARA PINY=1000 BAR Y CP=60 BAR ANTE DISTINTOS TIEMPOS DE ENERGETIZACIÓN.....	58
FIGURA 5. 7. COMPARACIÓN TASA INYECTADA EN LA TOBERAS A (AZUL) Y B (ROJO) PARA PINY=1000 BAR, CP=60 BAR Y ET=3000 MS	59
FIGURA 5. 8. COMPARACIÓN TASA INYECTADA EN LA TOBERAS A (AZUL) Y B (ROJO) PARA PINY=1000 BAR Y CP=60 BAR PARA DISTINTOS TIEMPOS DE ENERGETIZACIÓN.....	60
FIGURA 5. 9. MASA INYECTADA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE ENERGETIZACIÓN PARA PINY=1000 BAR Y CP=60 BAR	61
FIGURA 5. 10. FOTOGRAFÍA DEL ORIFICIO 1 DE LA TOBERA A A ESCALA 500 MM	62
FIGURA 5. 11. FOTOGRAFÍA DEL ORIFICIO 4 DE LA TOBERA A A ESCALA 100 MM	62
FIGURA 5. 12. FOTOGRAFÍA DEL ORIFICIO 1 DE LA TOBERA B A ESCALA 2 MM	62
FIGURA 5. 13. FOTOGRAFÍA DEL ORIFICIO 1 DE LA TOBERA B A ESCALA 200 MM.....	63
FIGURA 5. 14. PARTE DE LA PROGRAMACIÓN DE LA FUNCIÓN <i>DIAMETROLUPA</i> EN MATLAB.....	63
FIGURA 5. 15. VENTANA DE COMANDOS DE MATLAB.....	64
FIGURA 5. 16. SEÑALES PERIMETRALES DEL ORIFICIO 4 DE LA TOBERA A A ESCALA 200 MM.....	64
FIGURA 5. 17. INFORMACIÓN DEL FICHERO 'TOBERA_A_ORI5X063.SDAT' GENERADO.....	65

ÍNDICE DE TABLAS DE LA MEMORIA

TABLA 3. 1. COEFICIENTES DEL POLINOMIO DE LA VELOCIDAD DEL SONIDO.....	33
TABLA 4. 1. DATOS DE TASA EN LA HOJA DE CÁLCULO.....	48
TABLA 4. 2. PLAN DE ENSAYOS TOBERA A.....	51
TABLA 4. 3. PLAN DE ENSAYOS TOBERA B.....	51
TABLA 5. 1. MASA INYECTADA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE ENERGETIZACIÓN PARA PINY=1000 BAR Y CP=60 BAR.....	60
TABLA 5. 2. RESUMEN DE RESULTADOS DIÁMETRO TOBERA A.....	65
TABLA 5. 3. RESUMEN DE RESULTADOS DIÁMETRO TOBERA B.....	66

ÍNDICE DE TABLAS DEL PRESUPUESTO

TABLA 1. 1. CÁLCULO DEL COSTE DE LA MANO DE OBRA.....	76
TABLA 1. 2. CÁLCULO DEL COSTE DE LOS EQUIPOS.....	77
TABLA 1. 3. CÁLCULO DEL COSTE DEL MATERIAL.....	78
TABLA 1. 4. CÁLCULO DEL COSTE DEL MATERIAL FUNGIBLE.....	78
TABLA 1. 5. CÁLCULO DEL COSTE TOTAL.....	79
TABLA 1. 6. CÁLCULO DE LA TASA HORARIA Y AMORTIZACIÓN.....	80

I. MEMORIA

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

1.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de este proyecto es profundizar en el estudio de los motores dual fuel, motores de encendido por compresión basados en la combinación de la combustión de gas natural y diesel. El trabajo fin de grado expuesto se engloba dentro un proyecto europeo financiado de forma pública y en el que participan diferentes universidades y empresas, a nivel europeo y mundial.

Los motores dual fuel tradicionales trabajan con un solo inyector diesel de gran tamaño. Así es posible el funcionamiento utilizando diesel a plena carga, pero padecen problemas con elevadas tasas de sustitución del diesel (especialmente a partir del 70%). Actualmente se está investigando en la posibilidad de instalar dos inyectores por cilindro, uno grande para el funcionamiento a elevadas cantidades de diesel, y otro de menor tamaño capaz de trabajar correctamente cuando las cantidades inyectadas de diesel sean muy bajas (se pretenden alcanzar tasas de sustitución hasta del 99,5%).

En líneas generales, el Proyecto Europeo está planteado para dos años de duración y se puede dividir en dos grandes líneas de investigación:

- Evaluación de motores dual fuel para la operación con pequeñas cantidades inyectadas de diesel, tanto para sistemas de inyector simple como de doble inyector, y posterior comparación de los resultados entre ambas tecnologías, así como respecto a motores diesel convencionales.
- Creación de un modelo 3D CFD experimental para simular la combustión y la formación de contaminantes en grandes motores dual fuel. La herramienta debe ser capaz de describir correctamente el retraso de la combustión, la combustión premezclada y por difusión, y la propagación de la llama para los diferentes regímenes.

El Departamento de Máquinas y Motores Térmicos (DMMT), en representación de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), colabora en el proyecto participando en ambas líneas de investigación, tanto en el desarrollo del modelo experimental como en la comparación entre distintos tipos de inyectores.

En cuanto al trabajo fin de grado expuesto, la tarea a realizar ha consistido en la caracterización hidráulica de un inyector diesel solenoide piloto. Los resultados obtenidos de la caracterización hidráulica se utilizarán como condiciones de contorno en la creación del modelo CFD.

1.2. ANTECEDENTES

El Departamento de Máquinas y Motores Térmicos (DMMT), a lo largo de sus más de 30 años de trabajo, ha realizado numerosos estudios dirigidos a investigar los procesos termofluidodinámicos de los motores de combustión interna alternativos (MCIA).

Muchos de estos proyectos de investigación se han emprendido en colaboración con prestigiosas empresas vinculadas directa o indirectamente con los MCIA tales como: Renault, Grupo PSA (Peugeot-Citroën), Nissan, Volvo, Ford, BMW, Daimler, Bosch, Derbi, ECIA, Iveco, MAN, Repsol, General Motors, RENFE o la EMT de Valencia.

En la figura 1.1 aparece una fotografía de la fachada exterior del departamento.



Figura 1. 1. Edificio del CMT en la Universidad Politécnica de Valencia

La estructura de investigación del DMMT ha evolucionado siguiendo dos objetivos: el primero, elevar el nivel de conocimiento y la eficiencia científica, y el segundo, incrementar la capacidad productiva del grupo de investigación. En estos momentos el equipo de profesores, investigadores, ingenieros, técnicos y operarios que en sus inicios se llamó Grupo CMT, ha pasado a ser el potencial científico técnico del Instituto de Investigación CMT y está estructurado en las siguientes líneas de trabajo:

- Renovación de la carga
- Inyección
- Combustión
- Transferencia de calor
- Ruido
- Mantenimiento

Este trabajo se ha desarrollado dentro de la línea de Inyección cuya actividad consiste en analizar los distintos fenómenos físicos involucrados en los procesos de inyección así como aplicar el conocimiento obtenido, principalmente sintetizado en modelos para evaluar teóricamente y experimentalmente el potencial de las diferentes estrategias, sistemas, configuraciones geométricas o nuevos combustibles para la mejora de las prestaciones en los motores.

1.3. OBJETIVOS

La realización de este proyecto tiene como finalidad la consecución de tres objetivos diferentes.

En primer lugar, la colaboración en un proyecto de ámbito europeo en el que participan universidades europeas y empresas de gran relevancia en la investigación de los motores térmicos y la profundización en una tecnología incipiente y desconocida a nivel personal. Los sistemas de doble inyector en motores dual fuel pueden ser una alternativa muy interesante para un futuro no muy lejano, especialmente para grandes embarcaciones y vehículos de transporte y carga pesada, aumentando la fiabilidad de abastecimiento de combustible y reduciendo emisiones y costes de operación.

En segundo lugar, existe un objetivo puramente académico como es la realización del Trabajo Fin de Grado, paso necesario para obtener el título de Ingeniero de la Energía por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia, y de esta forma comenzar a desarrollar una carrera profesional.

Por último, también tratar de ampliar los conocimientos sobre el funcionamiento de los motores dual fuel y en concreto de los sistemas de inyección, con el aliciente de poder hacerlo en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia, poseedor de gran prestigio y reconocimiento a nivel internacional, y en el cual se ofrece la posibilidad de manejar equipos de última tecnología. Además, la oportunidad de trabajar en el ámbito de la investigación y de compartir experiencias de trabajo con profesionales de la investigación automovilística ha constituido una experiencia muy enriquecedora.

1.4. JUSTIFICACIÓN Y MOTIVACIÓN

En procesos industriales y especialmente en el sector del transporte, la factura del combustible es uno de los principales costes que afecta al coste total de operación. La rápida expansión y abundancia del gas natural en algunas zonas del mundo está dotando de una enorme ventaja económica al gas natural respecto al combustible diesel. Así, el gas natural se está postulando como una fuente de combustible alternativa para todas aquellas tecnologías tradicionales que funcionan con diesel. Para equipos de alta potencia, factores como la densidad de potencia y la eficiencia son críticos. Los motores dual fuel proporcionan una importante oportunidad para conseguir grandes reducciones en consumo y, por tanto, en costes de operación y emisiones.

Finalmente, se ha de destacar también la motivación que supone el adquirir valiosas experiencias en cuanto al trabajo en equipo, la toma de decisiones y la formación de tipo práctico, como consecuencia del trabajo en un entorno, el del grupo CMT, de contrastado prestigio. Su condición de Instituto Universitario le confiere un carácter en cierto modo asimilable al de una empresa privada, de modo que constituye una suerte de introducción al mundo laboral, con la ventaja adicional de poder contar en todo momento con personal docente orientando la realización de este proyecto de investigación.

1.5. VIABILIDAD

La viabilidad de realizar este proyecto ha estado garantizada en gran parte desde su concepción tanto en el aspecto tecnológico como humano y económico.

Tecnológicamente, se ha contado con todas las instalaciones y equipos de ensayo disponibles en el CMT, y específicamente en el laboratorio de inyección, para realizar el montaje deseado.

En el aspecto humano, el personal del CMT cuenta con una amplia experiencia en la investigación en lo concerniente a los motores de combustión interna alternativos (MCIA) y el proceso de inyección. Por esto, el aporte del conocimiento dado por investigadores y personal técnico, ha resultado de gran importancia para poder llevar a cabo este proyecto.

Por último, económicamente no ha existido restricción alguna durante la realización del proyecto, ya que por los requerimientos propios que exigía el proyecto, este se llevó a cabo con los elementos y equipos ya disponibles.

1.6. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

A continuación, se describen los dos documentos principales de que consta el presente proyecto:

- Memoria
- Pliego de condiciones

A un proyecto normal se le deberían de sumar dos documentos adicionales, el pliego de condiciones y documento de planos. Si bien es cierto que existen unos esquemas generales de la instalación en el capítulo 3 de la memoria.

El documento memoria se divide en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1. Planteamiento del proyecto: se especifican los objetivos, motivaciones, antecedentes y viabilidad del trabajo realizado.
- Capítulo 2. Marco teórico: se hace una introducción teórica sobre diferentes tipos de motores de combustión, haciendo énfasis en los sistemas dual fuel. También se describen el sistema de inyección diesel common-rail y el inyector solenoide.
- Capítulo 3. Instalaciones experimentales: se explica la instalación del tasímetro utilizada y su base teórica. Posteriormente se explican los elementos que la componen.
- Capítulo 4. Metodología: se describe el modo en que se procede a realizar los ensayos, el tratamiento de las señales que se obtienen y el plan de ensayos.
- Capítulo 5. Análisis de resultados: se explica la señal de tasa obtenida y posteriormente se expone la influencia de los distintos parámetros que afectan a la medida. Por último, se procede a explicar detalladamente el procedimiento de medida del diámetro real de las dos toberas con las que se han realizado las medidas.
- Capítulo 6. Conclusiones generales: se revisan los objetivos principales que justifican la realización, así como los resultados obtenidos tras analizar las medidas.

El documento presupuesto detalla los costes de inversión, la valoración del esfuerzo realizado y los recursos consumidos en el desarrollo del presente Trabajo Final de Grado.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN

Un motor es aquel dispositivo que permite transformar cualquier tipo de energía en energía mecánica. Dentro de los motores, aquellos que utilizan la energía térmica contenida en un fluido compresible para lograr su objetivo se denominan motores térmicos. Si además, el proceso de combustión tiene lugar en el propio fluido de trabajo, siendo éste generalmente una mezcla de aire y combustible, se denomina motor de combustión interna.

La división general de los motores de combustión interna alternativos (MCIA) se realiza en dos tipos:

- Motores de encendido por compresión (MEC). En los MEC, el inicio de la combustión se produce por el autoencendido de la mezcla aire-carburante debido a las condiciones internas locales de presión y temperatura dentro de la cámara de combustión. No existe en este tipo de motores ningún tipo de aporte energético desde el exterior. En este tipo de motores la inyección y la combustión se realizan casi simultáneamente, el combustible se quema a medida que se mezcla y evapora.
- Motores de encendido provocado (MEP). Los MEP son aquellos motores en los que el inicio de la combustión se realiza mediante el aporte energético exterior suministrado por el salto eléctrico entre electrodos de una bujía.

2.2. MOTORES DIESEL TIPO MEC

La gran mayoría de motores de encendido por compresión en el sector de la automoción funcionan con gasoil (diesel) como combustible. El diesel tiene la capacidad de autoencenderse en condiciones de alta presión y temperatura, por lo que no es necesaria la presencia de una bujía en el interior del cilindro.

La figura 2.1 representa las cuatro etapas de las que se compone el proceso de combustión en este tipo de motores:

- Admisión: el pistón se mueve desde el punto muerto superior (PMS) hasta el punto muerto inferior (PMI) con las válvulas de admisión abiertas, provocando así la aspiración del aire hacia el interior del cilindro. Esta es una de las diferencias principales con los MEP, que generalmente aspiran aire ya premezclado con el combustible.
- Compresión: el pistón en su ascenso por la carrera del cilindro comprime el aire presente en el cilindro, aumentando su presión y temperatura. El combustible se inyecta instantes antes de que el pistón llegue al PMS. En dicho momento, las

condiciones termodinámicas de la cámara de combustión permiten el autoencendido del combustible al entrar en contacto con el aire presurizado y caliente.

- Expansión: la energía liberada por la combustión aumenta drásticamente la presión en la cámara. Esta es la energía es la utilizada para accionar el cigüeñal y producir potencia.
- Escape: finalmente el pistón inicia una nueva carrera ascendente que, acompañada por la apertura de la válvula de escape, permite la expulsión de los gases producidos durante la combustión.

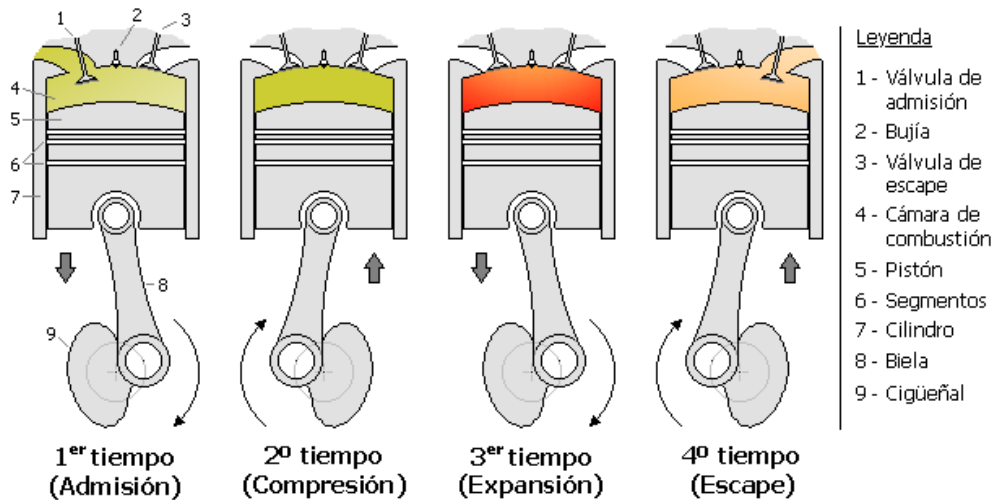


Figura 2. 1. Etapas de un motor de encendido por compresión de cuatro tiempos

2.3. MOTORES DE GAS NATURAL TIPO MEP

El gas natural es una alternativa interesante a los combustibles tradicionales debido a sus bajas emisiones de CO₂ y la ausencia de emisiones de SO_x y de partículas. Pese a que existen otro tipo de configuraciones para los motores de gas natural, la configuración con precámara de combustión es la que se utiliza en la inmensa mayoría de motores industriales y de gran tamaño.

La gran mayoría de motores de gas industriales o de grandes embarcaciones tienen una configuración con precámara de combustión como la descrita en este apartado. La existencia de la precámara es indispensable en motores de gran tamaño, pues la cámara de combustión principal es de un gran volumen y resulta muy complicado que el frente de llama alcance la cabeza del pistón. Además los elementos del motor son muy pesados y se requiere de una elevada energía para moverlos. En la precámara se inicia la combustión que posteriormente pasará a la cámara principal a través de pequeños orificios, formando una especie de llama que facilitará la combustión completa de la mezcla aire-gas.

La figura 2.2 representa el sistema de combustión descrito, formado por una precámara de combustión unida al cilindro por una serie de orificios. En el interior de la precámara se encuentra la bujía encargada de provocar la chispa y una válvula de garganta que permite la inyección del gas natural por diferencia de presiones.

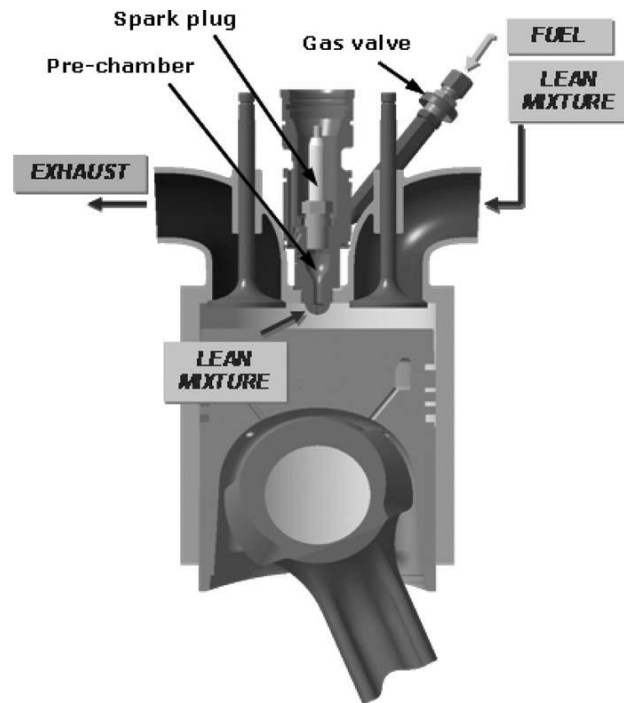


Figura 2. 2. Cámara y precámara de combustión de un motor de gas natural

El ciclo completo de estos motores se puede estructurar en las siguientes 5 etapas:

- Durante la carrera de admisión la válvula de garganta está cerrada y no se inyecta gas en la precámara. A través de la válvula de admisión se introduce en el cilindro una mezcla pobre de aire y gas natural.
- Durante la compresión la válvula de garganta sigue estando cerrada hasta que la presión en la cámara principal del cilindro alcanza un determinado valor, mientras que la presión en el interior de la precámara permanece constante.
- Cuando el pistón se aproxima al PMS, durante el final de la compresión, la válvula de garganta de la precámara se abre y se inyecta una pequeña cantidad de gas en la precámara a presiones relativamente bajas (inferiores a 5 bar). Simultáneamente se enciende la chispa en la bujía.
- La mezcla rica en el interior de la precámara se enciende gracias a la energía suministrada por la chispa de la bujía y la combustión iniciada pasa a la cámara principal a través de unos orificios creando una especie de llama que permite que ocurra la combustión completa de la mezcla existente en el cilindro.
- Las carreras de expansión y escape son idénticas a las de los motores convencionales.

2.4. MOTORES DUAL FUEL

Uno de los principales problemas de los motores de gas natural es la dificultad de abastecimiento. Así para embarcaciones y trenes que realizan trayectos de grandes distancias, pueden tener problemas a la hora de repostar el combustible. Con objeto evitar esta incertidumbre, actualmente están cogiendo gran popularidad los motores de encendido por compresión que combinan ambos tipos de combustible, gas natural y diesel. De esta forma, se consiguen obtener las ventajas que proporcionan los motores de gas natural al tiempo en que

se asegura el abastecimiento de combustible, pudiendo funcionar el motor con cualquiera de los dos o incluso con los dos simultáneamente.

Un motor dual fuel está basado en los motores diesel tradicionales, con la adición de algún componente específico. En los motores de combustible convencional, la ignición del carburante inyectado se produce porque la temperatura del gas comprimido en el cilindro sobrepasa la temperatura de ignición espontánea del combustible que, en el caso de combustible líquido, es de aproximadamente 210-230 °C. La temperatura de ignición espontánea de un gas puro, como el metano y el etano, está comprendida entre 470 y 540 °C. Por lo tanto, es necesario inyectar una pequeña cantidad de combustible piloto en el cilindro, ya que la temperatura registrada en la cámara de combustión en el momento de la inyección sería insuficiente para la ignición espontánea del gas. El comportamiento del chorro diesel equivaldría a la chispa de la bujía en motores de encendido provocado, y es el causante de la posterior combustión del gas natural [1].

Este tipo de motores proporciona la misma densidad energética, la misma curva de par mecánico, y la misma respuesta en transitorios que los motores diesel convencionales. Además, el rendimiento bruto también permanece constante.

Como se observa en la figura 2.3, el gas natural se introduce en la cámara de admisión, consiguiendo una mezcla de alta calidad. Esta mezcla aire-gas natural pasa al interior del cilindro del mismo modo en que se introduce el aire en los motores MEC convencionales, pero con un menor dosado relativo. Poco antes del final de la carrera de compresión, el chorro diesel se inyecta de la forma habitual. La autoignición por compresión y la posterior combustión provocan que se queme el gas natural comprimido en el cilindro.

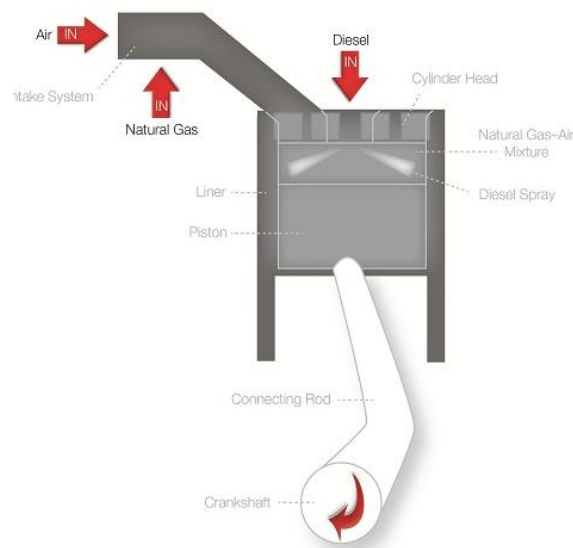


Figura 2. 3. Operación motores dual fuel

Un motor dual fuel puede operar con un 100% de combustible diesel sin problema, sin embargo no es posible la operación exclusiva con gas natural. Este hecho se explica debido a la necesidad de una cantidad mínima de energía que provoque el encendido de la mezcla diesel-gas-aire.

La tasa de sustitución es un parámetro crítico, y se define como la fracción de la energía total proveniente de la combustión del gas natural. El valor máximo obtenido es de alrededor del 70% para condiciones de alta carga. Para la operación a cargas bajas la cantidad de gas natural máxima a utilizar disminuye drásticamente. [2]

La figura 2.4 muestra una curva de sustitución típica a lo largo del régimen de operación de un motor dual fuel. El objetivo es trabajar en zonas con alta tasa de sustitución, donde la reducción de los costes de combustible es máxima.

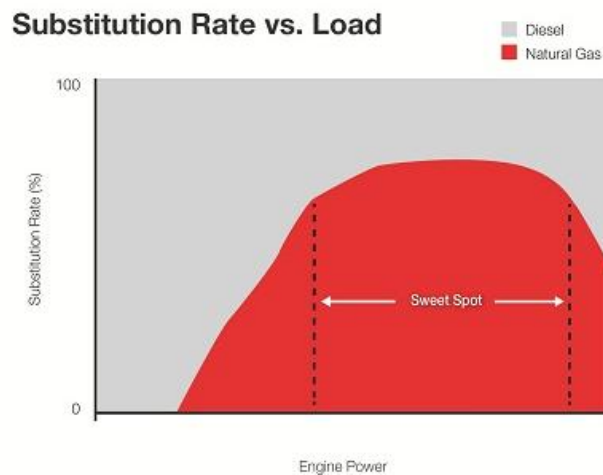


Figura 2. 4. Ratio de sustitución en función de la carga

2.4.1. SISTEMA DE DOBLE INYECTOR

La tasa de sustitución limita las mejoras obtenidas con el uso del gas natural, pues se hace imprescindible la utilización de una cantidad mínima de diesel (alrededor del 30%).

Una posibilidad muy interesante consiste en la utilización de un sistema de inyección de doble inyector. De esta forma se tiene un inyector de gran tamaño que opera en las condiciones del motor dual fuel tradicional, es decir, a funcionamiento de diesel a plena carga o con bajas cargas de sustitución; y un inyector menor, capaz de funcionar correctamente inyectando pequeñas cantidades de diesel simulando el papel de la bujía en los motores de encendido provocado. Con esta nueva tecnología se pretenden alcanzar tasas de sustitución hasta del 99,5%, funcionando el motor casi completamente a gas natural.

En la figura 2.5 se representa el sistema de doble inyector, con uno pequeño en la parte izquierda para altas tasas de sustitución y uno de grandes dimensiones para funcionamiento con altos porcentajes de diesel.

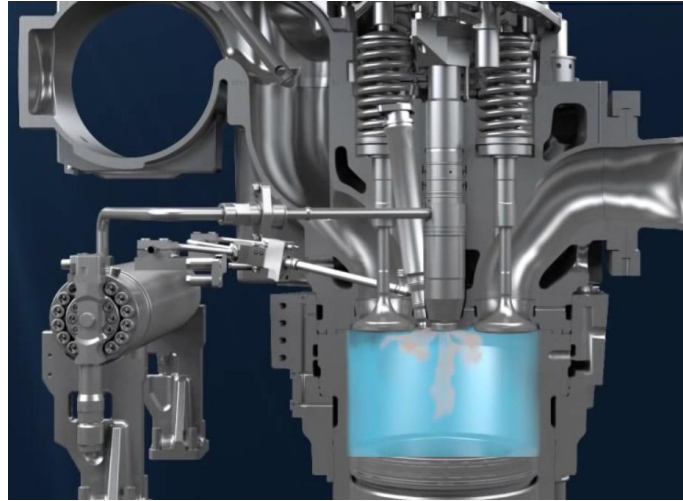


Figura 2. 5. Motor dual fuel con sistema de doble inyector

En la figura 2.6 se representa una de las principales ventajas de la utilización del doble inyector, la reducción de los costes de operación por mejora en la eficiencia del motor. Estos bajos costes junto con la fiabilidad de suministro convierten a este tipo de motores en una opción de gran interés para la industria naval. [3]



Figura 2. 6. Reducción costes respecto a motores diesel convencionales

2.5. SISTEMA DE INYECCIÓN

El sistema de inyección es el conjunto de elementos encargados de suministrar el combustible al motor, y de hacerlo en la forma más apropiada en cada instante, para ello debe aportar y atomizar el gasoil de la siguiente manera:

- En el modo adecuado: El instante en el que se produce la inyección se rige por el régimen y por el grado de carga del motor. Además, se modifica conforme a dicho régimen, de forma que la máxima presión en cámara tenga lugar una vez que se haya alcanzado el punto muerto superior.

- En la cantidad precisa: La cantidad de masa inyectada está directamente relacionada con el grado de carga y, por tanto, con el par disponible. El límite superior, normalmente, viene determinado por el par máximo admisible mecánicamente, con el mínimo dosado, que está relacionado directamente con la formación de CO, con la emisión de hidrocarburos sin quemar (HC) y con el propio rendimiento de la combustión.
- De una forma determinada (ley de inyección): La ley de inyección o tasa de inyección mide la forma en la que el combustible es inyectado durante el proceso de inyección del mismo, en la cámara de combustión.[4]

2.5.1. COMMON-RAIL

La inyección de diesel a elevadas presiones se realiza a través de un sistema de almacenamiento del combustible a presión denominado common-rail. Los motores dual fuel utilizan esta tecnología para la inyección del chorro diesel piloto, así como para el funcionamiento íntegro diesel, por lo que en este apartado se procede a explicar sus características, funcionamiento y elemento principal, el inyector.

El common-rail recibe esta denominación debido a que la distribución del combustible hacia los cilindros está constituida por un único raíl al que se conectan todos los inyectores del sistema. Presenta las siguientes ventajas:

- Control del punto de inicio y de la duración de la inyección
- Alta presión de inyección
- Presión de inyección independiente del régimen de giro del motor
- Presión de inyección prácticamente constante a lo largo de la inyección
- Posibilidad de descomponer la inyección empleando inyección piloto o inyecciones múltiples

La gran diferencia que introduce el sistema common-rail frente a los sistemas convencionales es la posibilidad de independizar la generación de presión y la inyección, de manera que la presión de inyección obtenida no se ve influenciada por el régimen de funcionamiento del motor ni por el caudal de inyección. Esta presión está disponible a nivel constante en el raíl, que actúa como acumulador de presión. La opción de mantener constante una presión elevada permite una definición más precisa de la ley de inyección, ajustando el momento y el caudal inyectado y optimizando el consumo de combustible. Estas características contribuyen a la mejora de los MEC de inyección directa en aspectos tan importantes como el ruido, la emisión de gases y el par obtenido en el motor.

Gracias a la rápida capacidad de respuesta que poseen los inyectores existe la posibilidad de realizar varias inyecciones en un ciclo, de forma que se aumente la eficiencia de la combustión y además se reduzcan las emisiones.

En la figura 2.7 se muestra un esquema de un sistema common-rail. En ella se observa como una bomba de baja presión toma el combustible del depósito y alimenta la bomba de alta presión. A su vez, la bomba de alta presión, accionada por el cigüeñal del motor, trasiega combustible, a través del raíl, hacia los inyectores situados en los diferentes cilindros del motor. Una parte de este combustible es inyectado en la cámara de combustión y otra parte,

mucho menor que la anterior, se utiliza para el pilotaje hidráulico de los inyectores. Esta fracción de combustible vuelve al depósito constituyendo el caudal de control o retorno de los inyectores.

El volumen de combustible comprendido entre la bomba de alta presión y los inyectores actúa como un acumulador (raíl común). Aparte de actuar como depósito acumulador, el raíl hace las veces de elemento amortiguador de las oscilaciones de presión generadas por las emboladas de los pistones de la bomba de alta presión, así como aquellas perturbaciones originadas por la rápida salida del combustible por los orificios de descarga de los inyectores.

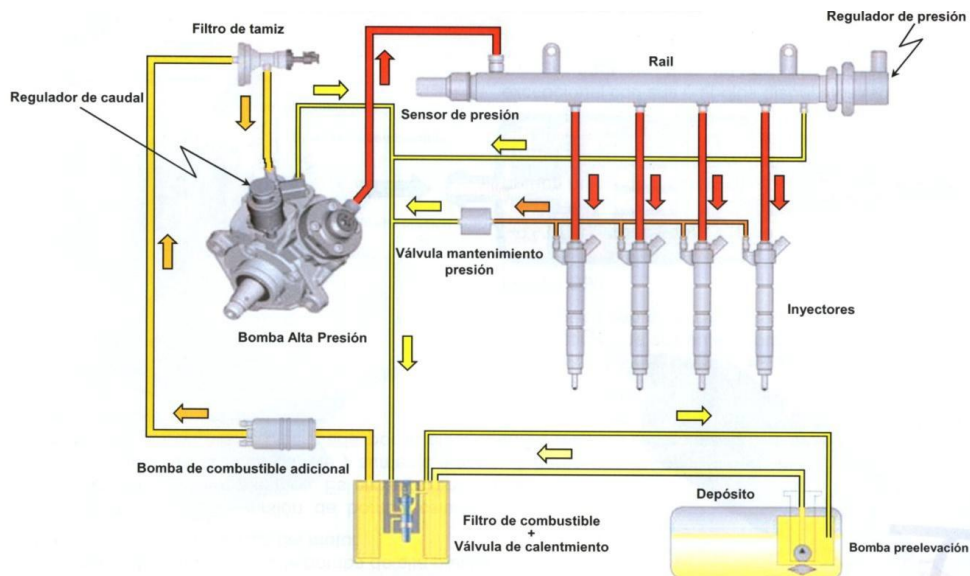


Figura 2. 7. Circuito de combustible

La duración del pulso, la presión existente en el raíl y el área de la tobera determinan la cantidad de combustible inyectado que resulta, pues, independiente del régimen de giro del motor. Esto supone una gran ventaja, pues permite seleccionar en cada momento las condiciones óptimas de inyección. [5]

2.5.2. INYECTOR

Sin duda, la parte más compleja e importante del sistema common-rail es el inyector. En función del sistema de accionamiento interno del inyector se tienen inyectores accionados por válvula de tipo solenoide o bien de inyectores accionados por válvula de tipo piezoeléctrico.

El inyector caracterizado para este proyecto ha sido de tipo solenoide. Estos son los primeros inyectores diesel electrónicos que se fabricaron, denominados también de primera generación.

En la figuras 2.8 y 2.9 pueden apreciarse los componentes principales del inyector: la válvula electromagnética; el portainyector, que incluye cuerpo, racor de alta presión, filtro y muelle de la tobera, y la tobera, formada por cuerpo y aguja. La válvula electromagnética consta de orificios independientes para la entrada y la salida, y tiene dos posiciones correspondiendo a válvula abierta o cerrada.

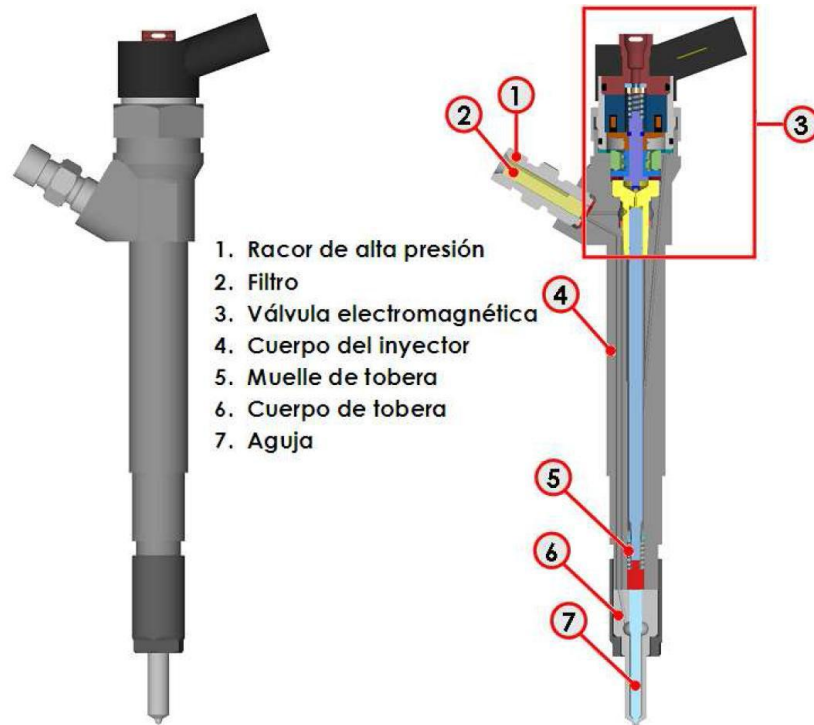


Figura 2. 8. Inyector de tipo solenoide

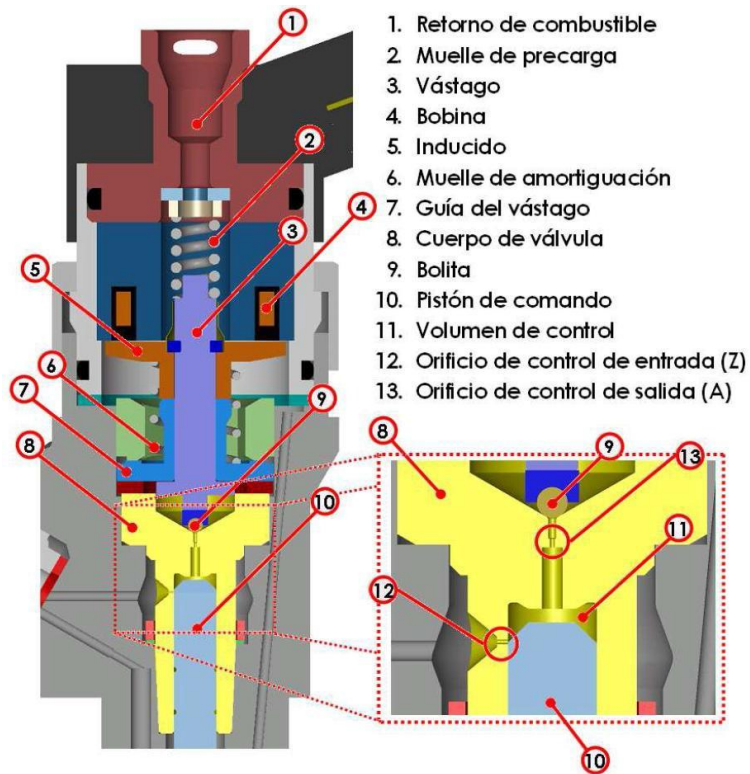


Figura 2. 9. Detalle de la válvula del inyector de tipo solenoide

Cuando el solenoide no se encuentra activado, el combustible alojado en el volumen de control (11), al no poder salir por el orificio de control de salida (13), ejerce presión sobre la

parte superior del pistón de comando (10), que de este modo mantiene la aguja de la tobera en contacto con su asiento, impidiendo la salida de combustible.

Al aplicar un pulso al inyector, el solenoide se activa y ejerce una fuerza electromagnética de atracción sobre el vástago (3) que consigue vencer la fuerza del muelle de precarga, separando así la bolita (9) del cuerpo de la válvula. Esta separación de la bolita permite que suba el combustible presente en el volumen de control, que deja de presionar al pistón de comando para fugar por el orificio de retorno (1) que se encuentra a una presión menor. Al disminuir la fuerza del pistón de comando, la aguja de la tobera se eleva, permitiendo que tenga lugar la inyección de combustible.

El caudal de gasoil utilizado para labores de control dentro del inyector retorna al depósito de combustible a través del orificio de control de salida y el retorno de combustible. Junto con el caudal de control, existen caudales de fuga en el alojamiento de la aguja de la tobera y del pistón de comando. Estos caudales de control y fugas se reconducen al depósito a través del retorno mediante una línea colectiva a la que están conectados tanto los inyectores como la válvula reguladora de presión.

Cuando el solenoide deja de recibir pulso, desaparece la fuerza electromagnética que atraía al vástago. La bolita desciende y se recupera la presión en la parte superior del pistón al entrar el combustible en el volumen de control a través del orificio de control de entrada (12). Esto hace que la aguja de la tobera descienda hasta apoyarse nuevamente sobre su asiento, poniendo fin a la inyección.

La cantidad de combustible inyectado depende del número y diámetro de los orificios de la tobera, del tiempo de activación de la electroválvula y de la presión del combustible en el raíl. Si el tiempo de activación de la electroválvula es corto, la aguja del inyector se levanta parcialmente, y por lo tanto la cantidad inyectada será pequeña. Cuando la duración del pulso de mando de la electroválvula es más grande, la aguja se levanta hasta su tope mecánico resultando una mayor cantidad de masa total inyectada.[5]

CAPÍTULO 3. INSTALACIONES EXPERIMENTALES

3.1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo trata de conseguir la caracterización de un inyector diesel tipo solenoide. Para ello se realizan medidas de tasa de inyección, proceso de gran importancia en la combustión tanto de los motores diesel convencionales como de los motores dual fuel tratados en este caso. El proceso de inyección y la cantidad de tasa inyectada determinan las prestaciones, emisiones y ruido del motor, por lo que la medida de tasa es uno de los objetivos más importantes en la investigación de la inyección diesel.

En este capítulo se explica de forma detallada la instalación utilizada para la realización de los ensayos necesarios. Los métodos experimentales de determinación de la tasa de inyección tienen como principal dificultad las altas presiones y el tamaño reducido de varios componentes del sistema.

3.2. INSTALACIÓN DE TASA DE INYECCIÓN

La medición de tasa de inyección es un procedimiento de obtención del gasto másico instantáneo a la salida de los orificios del inyector. Esta medida se realiza en una instalación denominada tasímetro.

En la figura 3.1 se muestra la instalación completa. En ella encontramos el tasímetro conectado con los elementos del sistema de inyección, la balanza, y los aparatos electrónicos de regulación y medida.

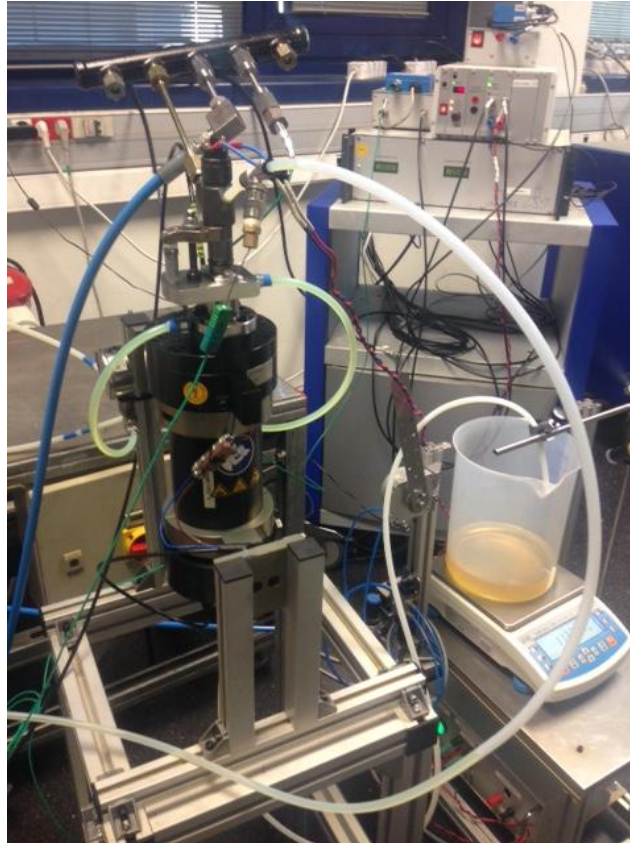


Figura 3. 1. Instalación del tasímetro

3.2.1. PRINCIPIO DE MEDIDA

La medida de la tasa de inyección se basa en el principio de propagación de ondas de presión en una columna de líquido. Para relacionar el flujo másico de combustible inyectado con la variación de presión creada por la onda de presión, se plantea el estudio de propagación de una onda plana dentro de un tubo de sección constante. Haciendo uso de la ecuación de Allievi (3.1) se llega a:

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta u \quad (3.1)$$

donde

Δp = variación de presión

ρ = densidad del fluido

a = velocidad del sonido en el combustible

Δu = variación de la velocidad

La velocidad del sonido en el combustible “ a ” depende de la temperatura y presión del carburante, por lo que es necesario conocer una correlación de este parámetro a fin de poder determinar la tasa de inyección con precisión. La correlación empleada desarrollada en [6] es la siguiente (3.2):

$$a = k_1 + k_2 \cdot (T - T_0) + k_3 \cdot (p - p_0) + k_4 \cdot (p - p_0)^2 + k_5 \cdot (p - p_0) \cdot (T - T_0) \quad (3.2)$$

donde

T_0 (temperatura de referencia) = 298 K

p_0 (presión de referencia) = 1 bar

k_i = coeficientes del polinomio mostrados en la tabla 3.1

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
1363.05	-3.11349	4.1751	-0.00696763	0.00940137

Tabla 3. 1. Coeficientes del polinomio de la velocidad del sonido

Por otra parte, la expresión de la variación del caudal másico (m) al paso de la onda de presión (3.3) se puede expresar como:

$$m = \rho \cdot A_t \cdot \Delta u \quad (3.3)$$

Combinando las ecuaciones 3.1 y 3.3 se obtiene la expresión del gasto másico instantáneo en función de la variación de presión instantánea respecto a la presión (3.4):

$$m = \frac{A_t}{a} \cdot \Delta p \quad (3.4)$$

De tal forma que conociendo la sección del tubo del tasímetro y la velocidad del sonido en el combustible a dicha presión y temperatura, queda determinada la tasa de inyección en función de la variación de presión que provoca la onda. [6]

3.2.2. DESCRIPCIÓN DE LA MAQUETA

3.2.2.1. TASÍMETRO

El tasímetro o caudalímetro es la instalación que permite la medida de la cantidad de masa inyectada por un inyector en cada ciclo. Existen distintas configuraciones pero la más extendida, y la utilizada en el departamento CMT, es la del sistema Bosch de tubo largo (figura 3.2).

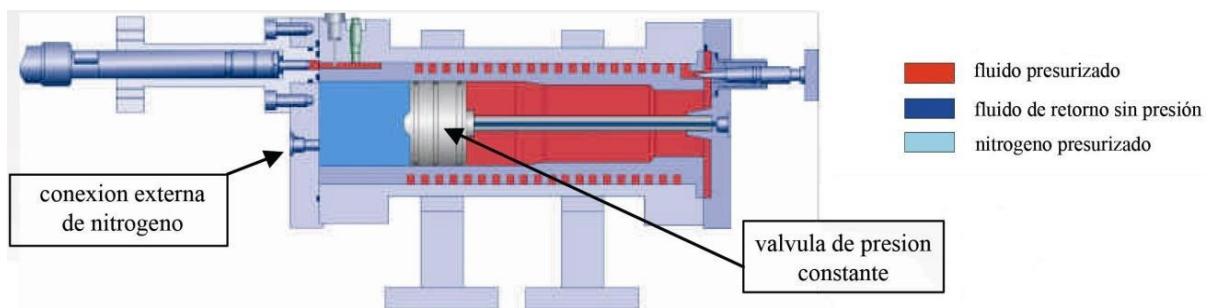


Figura 3. 2. Esquema del interior del tasímetro [7]

La maqueta consiste en un cilindro con un pistón que se desliza longitudinalmente y que separa el volumen interior en dos cámaras. Por un extremo se inyecta combustible a través de un inyector fijado en un portainyector, mientras que en el otro se inyecta nitrógeno que ejerce una contrapresión de consigna y que pretende simular las condiciones de presión de un inyector real. Hay que tener en cuenta que nitrógeno y combustible nunca están en contacto, pues están separados por la cabeza del pistón.

La medida de tasa se realiza mediante la medida de las ondas que alcanzan un sensor de presión. La inyección del combustible genera una onda de presión que viaja a lo largo del tubo, desde la tobera hasta el depósito del otro extremo, donde es atenuada de forma parcial. Sin embargo, una parte de esta onda se refleja y vuelve hacia el inyector, pudiendo causar errores de medida. Para evitar esto se utilizan tasímetros con una relación carrera diámetro elevada.

3.2.2.2. CIRCUITOS HIDRÁULICO Y ELÉCTRICO

En las figuras 3.3 y 3.4 se muestra el esquema hidráulico-neumático de la instalación y el eléctrico, con todos sus elementos y la dirección del flujo.

La parte hidráulica se puede dividir en dos partes: la de baja presión y la de alta presión. La parte de baja presión comporta la parte del circuito desde el depósito hasta la bomba pasando por el filtro, así como los retornos de la bomba, raíl y tasímetro, mientras que la parte de alta presión la forman las líneas de alta presión, el raíl y el inyector, todos ellos situados aguas arriba de la bomba.

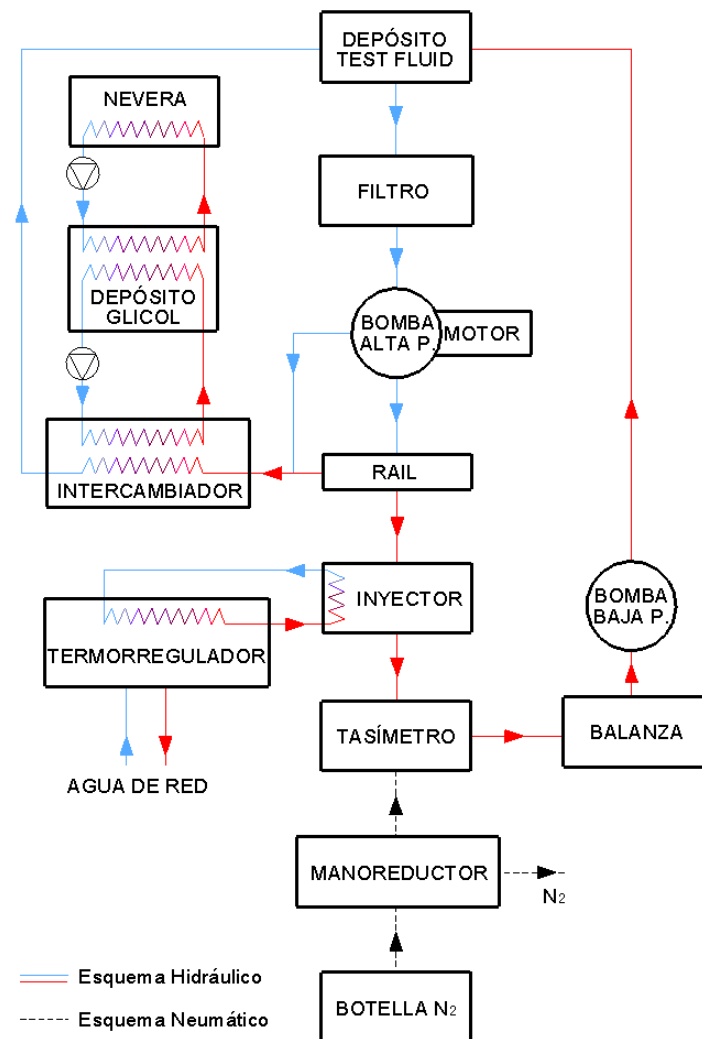


Figura 3. 3. Esquema hidráulico de la instalación de tasa [6]

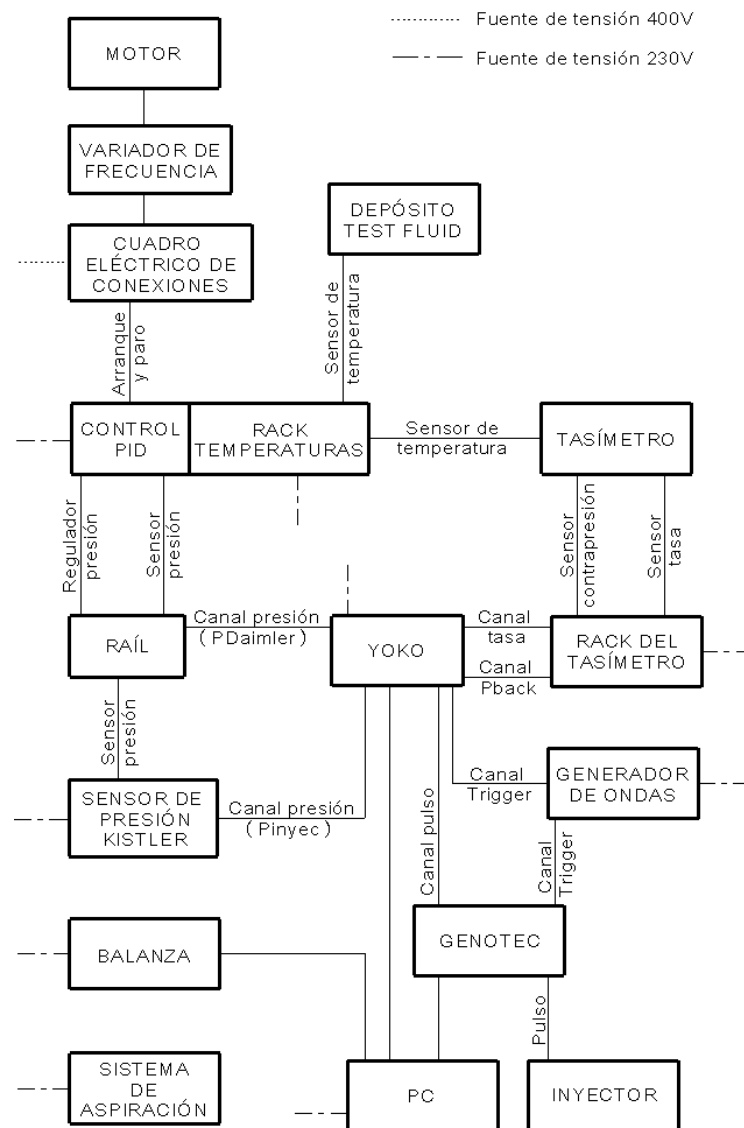


Figura 3. 4. Esquema eléctrico de la instalación de tasa [6]

3.2.3. ELEMENTOS

3.2.3.1. RAÍL

El raíl utilizado en el proyecto es un common-rail estándar utilizado en la automoción y que permite trabajar a elevadas presiones de inyección, pudiendo alcanzar los 2000 bar.

Este raíl está formado por una entrada del combustible a presión procedente de la bomba, cuatro salidas hacia los inyectores situados en los cilindros, y una salida de baja presión destinada al retorno del combustible hacia el depósito.

Para los ensayos realizados en el proyecto únicamente se va a utilizar un inyector por lo que, de las cuatro salidas, sólo una va a estar conectada a un inyector. Otra salida se utilizará para colocar un sensor de presión, y las dos restantes se cerrarán con tapones.

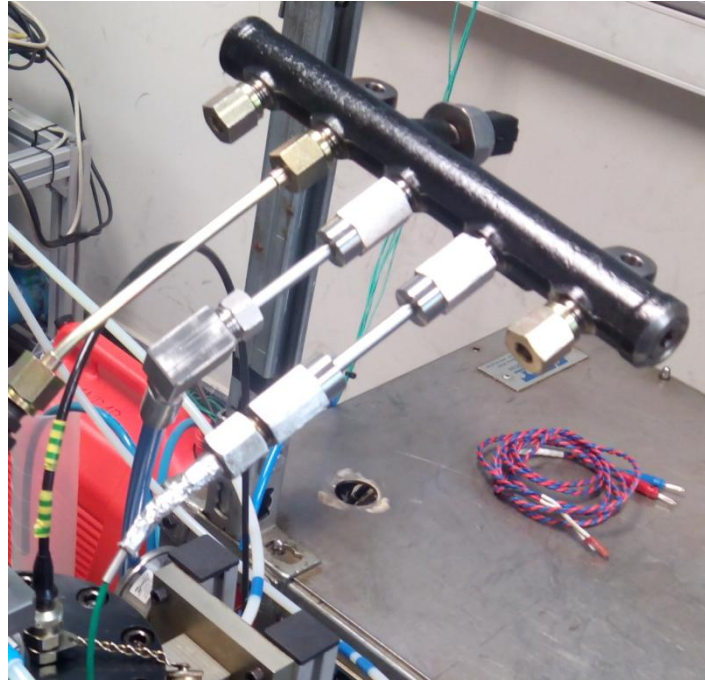


Figura 3. 5. Raíl

3.2.3.2. INYECTOR

El inyector es elemento que se sitúa en el extremo del circuito de alta presión. Su función es inyectar el combustible en el interior del cilindro, o de la maqueta en este caso. En la instalación de medida de tasa el inyector se encuentra montado dentro del porta-inyector. Para asegurar la estanqueidad se dispone de juntas tóricas, mientras que para la fijación dentro del porta-inyector se utiliza la garra, que hace fuerza sobre el inyector en su eje longitudinal. Para este proyecto se va a utilizar un par de fuerza de 15 Nm.

En el proyecto se caracteriza un inyector de tipo solenoide de una prestigiosa marca de inyectores. En la figura 3.6 se representa una fotografía de dicho inyector, donde se observa la tobera en el extremo derecho.



Figura 3. 6. Inyector

La figura 3.7 consiste en un esquema del portainyector con todos sus elementos: Garra (1), Inyector (2), punto de apoyo (3), tornillo (4), portainyector (5), centrador (6), maqueta (7), línea de admisión (8), conexión cables de alimentación (9).

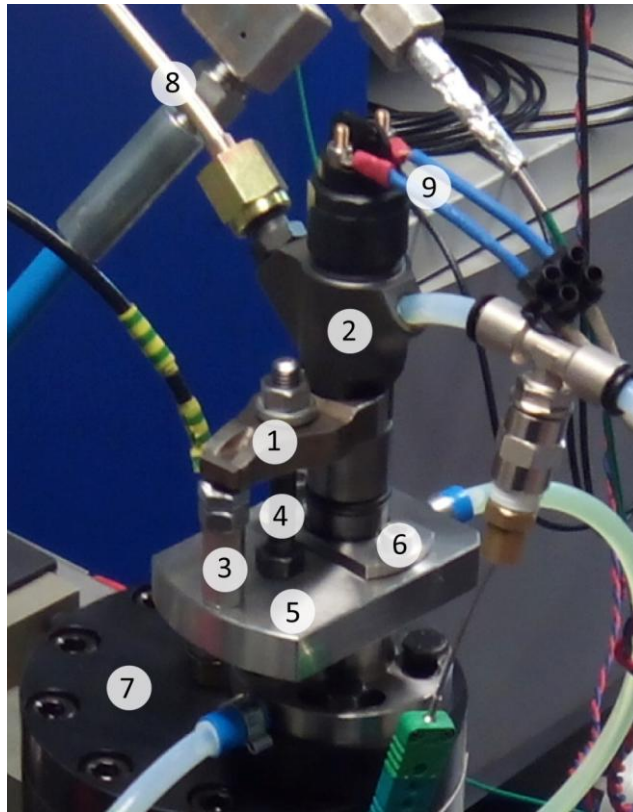


Figura 3. 7. Esquema del montaje del inyector

3.2.3.3. FILTRO DE COMBUSTIBLE

El filtro de combustible se sitúa a la salida del depósito de combustible, justo antes de la bomba de impulsión. Su función es evitar la acumulación de impurezas en la bomba y el raíl durante el funcionamiento del motor, y así evitar posibles daños a largo plazo.

El filtro utilizado en la maqueta es un filtro convencional de automóvil y se muestra en la figura 3.8.



Figura 3. 8. Filtro de combustible

3.2.3.4. LÍNEAS DE COMBUSTIBLE

Como ya se ha ido diferenciando, en un motor convencional existen dos tipos de líneas de combustible, las de alta y las de baja presión. Las conexiones de baja presión son de poliuretano y soportan hasta 8-10 bar de presión en su interior, mientras que las conexiones de alta presión utilizadas soportan presiones de hasta 2800 bar con diámetros inferiores a 3 mm. Estas líneas de alta presión pueden ser rígidas de acero o flexibles.

La figura 3.9 representa los tres tipos de líneas características en un motor.

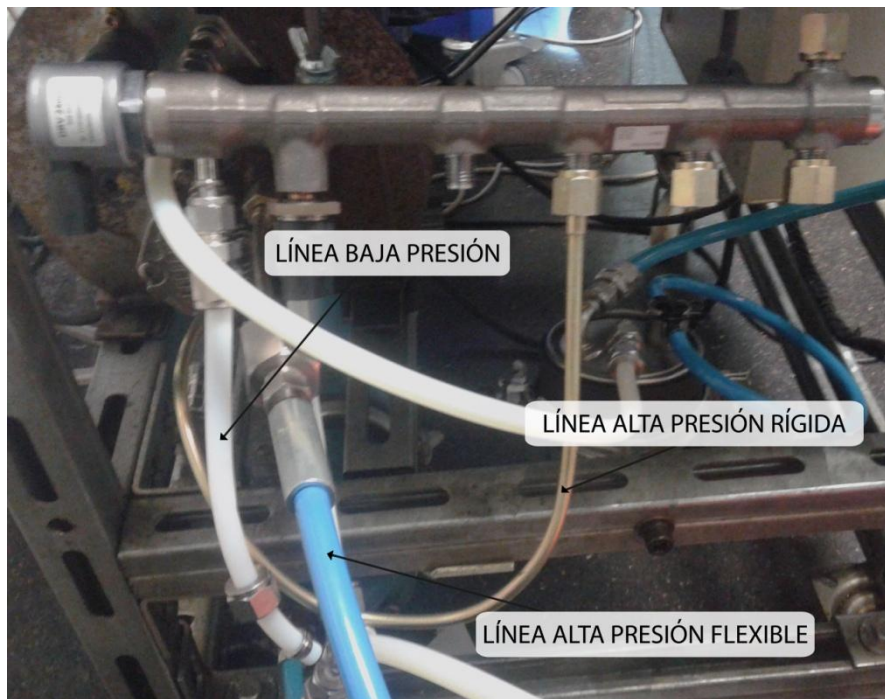


Figura 3. 9. Tipos de líneas de combustible

3.2.3.5. TERMORREGULADOR

El termorregulador (figura 3.10 izquierda) consiste en un bomba de calor que calienta una mezcla de agua y alcohol (glicol) y la envía al portainyector. Se utiliza un termorregulador *ATR2E 3W*, ya que es un aparato con buena rapidez de respuesta. Tiene un intercambiador compacto interno muy eficiente que permite la transferencia de calor al fluido de trabajo rápidamente.

El portainyector (figura 3.10, derecha) es la pieza que abraza al inyector y que permite mantener la temperatura del inyector a temperaturas de alrededor de los 70°C. De esta forma se simulan las condiciones reales en la culata de un motor durante el funcionamiento.



Figura 3. 10. Termorregulador (izquierda) y portainyector refrigerado (derecha)

3.2.3.6. BALANZA DE PRECISIÓN Y SISTEMA DE ASPIRACIÓN

La balanza de precisión es una balanza Radwag, con un rango de medida entre 0 y 600 gramos y una precisión de 0.01 gramos. Sobre la balanza se sitúa el vaso sobre el cual se depositará el combustible procedente de la salida del tasímetro.

Un software programado previamente en el CMT, el *xbalancin*, se encarga de tomar los resultados proporcionados por la balanza y graficarlos en el monitor del ordenador.

El sistema de aspiración adjunto se utiliza para retornar el combustible presente en el vaso hasta el depósito tras finalizar los ensayos. Se utiliza una pequeña bomba capaz de evacuar el volumen total del vaso en un tiempo relativamente corto.

La figura 3.11 representa el conjunto formado por la balanza, vaso de acumulación y línea de aspiración.

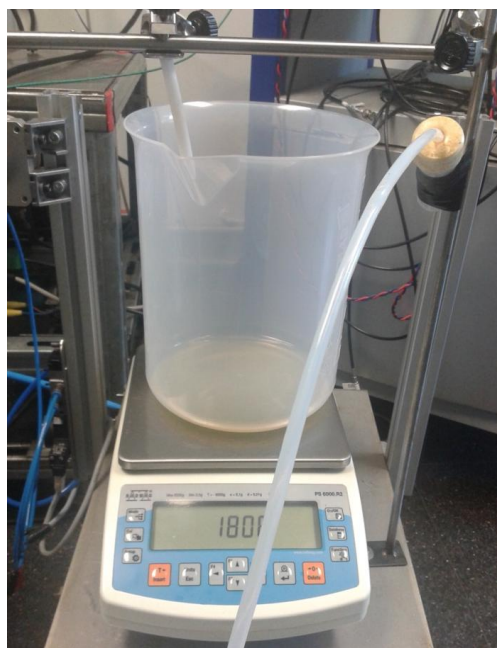


Figura 3. 11. Balanza, vaso y sistema de aspiración

3.2.3.7. BOTELLA DE NITRÓGENO

El nitrógeno necesario para conseguir la contrapresión en el interior del tasímetro es suministrado por botellas de nitrógenos. Las botellas utilizadas en el CMT tienen una presión interior de 200 bar y contienen un manorreductor que permite regular la presión aplicada a la maqueta.

El manorreductor es un aparato con dos relojes que indican la presión tanto de la botella como en el interior de la maqueta.

3.2.3.8. GENOTEC

El Genotec es el aparato que se encarga de mandar el pulso de inyección al inyector.

La figura 3.12 muestra una fotografía tomada durante la realización de las medidas. En ella se observa una pinza amperimétrica unida al cable de banana rojo. La función de dicha pinza es la medida de la corriente real enviada inyector, verificando así que el pulso recibido por éste es el correcto.

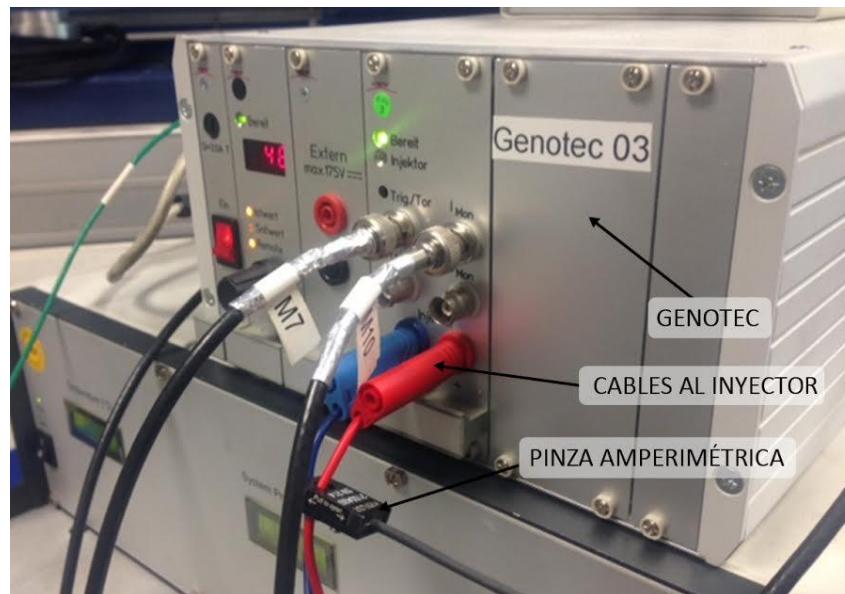


Figura 3. 12. Genotec

El primer paso consiste en definir el gráfico de pulso de inyección a través del software de ordenador *MagnetinjektorV2*. En este caso la forma de la señal es suministrada por la empresa del inyector ensayado. Una vez definido se manda hasta el Genotec que se encarga de enviar corriente hasta el solenoide del inyector.

3.2.3.9. GENERADOR DE ONDAS

El generador de ondas en este caso genera onda cuadrada a una determinada frecuencia, que en el caso del ensayo de tasa es de 10 Hz. Esta frecuencia de trigger o disparo marca cada cuanto tiempo se envía la señal de pulso al inyector.

Para la medida de tasa es muy importante tener contabilizada la frecuencia de inyección, debido a que la balanza de precisión calcula la masa inyectada en un cierto intervalo

de tiempo. Así, dividiendo la masa medida en un intervalo de tiempo entre las inyecciones realizadas por segundo, se obtiene la masa medida por inyección, que es el objetivo del ensayo. Este método permite verificar las medidas obtenidas con el sensor de presión. función del número de inyecciones calcula masa total inyectada.

En la figura 3.13 se muestra el generador de ondas utilizado.

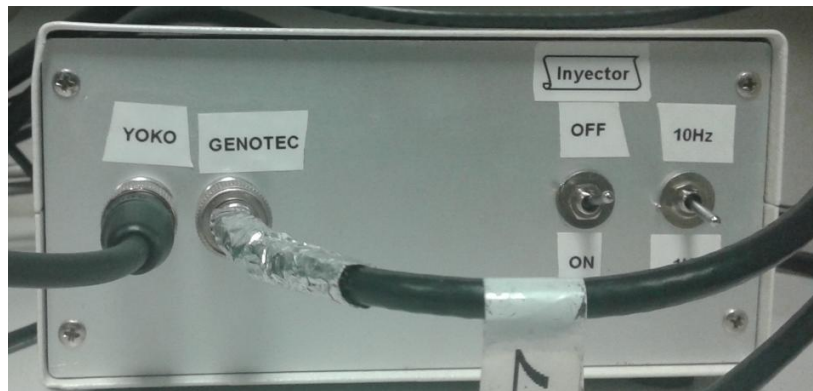


Figura 3. 13. Generador de ondas

3.2.3.10. PID Y RACK DE TEMPERATURAS

El PID y el Rack de temperaturas, son dos aparatos distintos pero que en este caso se encuentran físicamente dentro del mismo cajón (figura 3.14).

La función del Rack de temperaturas es mostrar por pantalla los valores de temperatura de los termopares montados en la instalación. En este caso muestra la temperatura del depósito, la temperatura del portainyector, y la temperatura del retorno de combustible.

El PID gobierna la actuación del regulador de presión del raíl, ya sea en modo manual o automático. En manual se actúa sobre el porcentaje de actuación de la aguja del regulador, mientras que en automático se fija en el display una presión objetivo para el interior del raíl y el PID automáticamente se ajusta a ella, comprobando con el sensor de presión que tiene el raíl en el otro extremo.



Figura 3. 14. PID y rack de temperaturas

3.2.3.11. RACK DEL TASÍMETRO

El rack del tasímetro es el encargado de transformar las señales que provienen del tasímetro, que son la señal de tasa y la señal de contrapresión. Posteriormente se encarga de traducirlas para que el sistema de adquisición de datos las muestre por pantalla.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

4.1. INTRODUCCIÓN

Una vez explicadas la instalación, en este capítulo se presenta la metodología seguida para realizar los ensayos. Se describe el software utilizado, el procedimiento seguido para la realización de las mediciones, y el tratamiento y procesado de los datos. Por último, se expone el plan de ensayos que se realiza para la correcta caracterización del inyector.

4.2. SOFTWARE UTILIZADO

4.2.1. MAGNETINJEKTOR V2

Es el software encargado de crear el pulso y mandarlo al Genotec, que este a su vez se lo envía al inyector, de manera que al final la aguja del inyector abre o cierra en función de la señal enviada por este programa.

El grado de apertura de la aguja de la tobera de un inyector, y por tanto, la cantidad de masa inyectada, viene determinado por la tensión y la corriente del pulso enviado. Para el caso los inyectores de tipo solenoide, para una corriente mínima la aguja del inyector cierra totalmente contra la tobera, mientras que conforme aumenta dicha corriente la aguja se va abriendo progresivamente.

El pulso de inyección es una de las especificaciones iniciales definida por la dirección del proyecto y su forma se basa en la señal de pulso eléctrico enviada por la ECU. La figura 4.1 representa la señal de pulso a seguir en este caso, que es proporcionada por el fabricante del inyector en la hoja técnica. En ella se observa la forma del pulso enviado al inyector, compuesto por un pico de corriente de apertura (boost current) seguido de una corriente de menor valor que mantiene la bobina accionada (hold current). El tiempo de duración de la segunda etapa de la inyección es conocido como tiempo de mantenimiento o de energización.

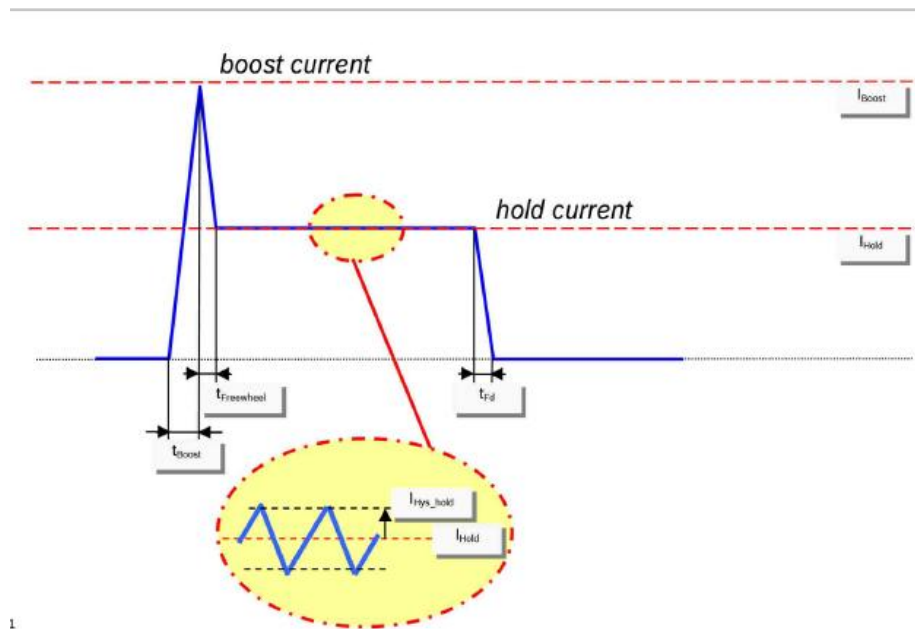


Figura 4. 1.. Señal de pulso enviada al Genotec [8]

La figura 4.2 muestra la interfaz del programa magnetinjektorV2. En la ventana de pulsos se especifican algunos de los parámetros demandados por el Genotec, como son el ángulo de avance de la inyección, el tiempo de retraso de inyección, o el tiempo de energización. Para la realización de este proyecto la única variable de trabajo es el tiempo de energización.

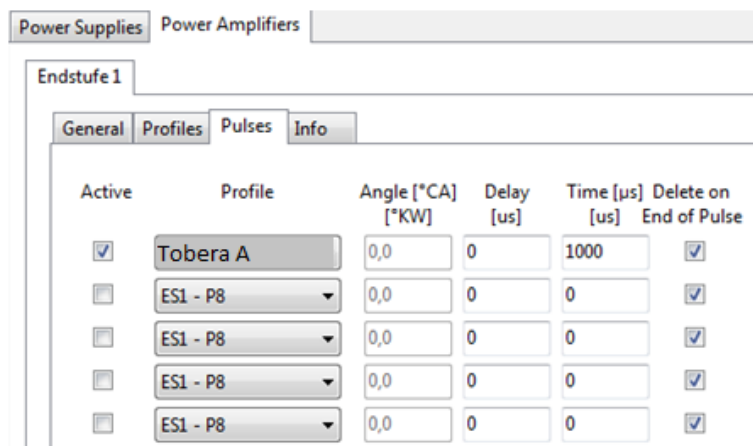


Figura 4. 2. Interfaz de la ventana de pulsos del software magnetinjektorV2

4.2.2. YOKO DL716

Este programa se encarga de establecer la configuración entre el ordenador y el sistema de adquisición de datos. En él se indica el número de repeticiones o muestras que se quieren almacenar. Para estos ensayos se van a obtener 50 muestras que posteriormente se promedian, de forma que los valores obtenidos se puedan considerar estadísticamente fiables. Una vez tomadas las 50 muestras, el programa se encarga de grabarlas en el ordenador para el posterior procesamiento de los datos obtenidos.

La figura 4.3 muestra la interfaz del programa YOKO DL716. En este caso los parámetros necesarios son el nombre del punto de medida, la frecuencia de muestreo, y el número de bloques o muestras a medir.

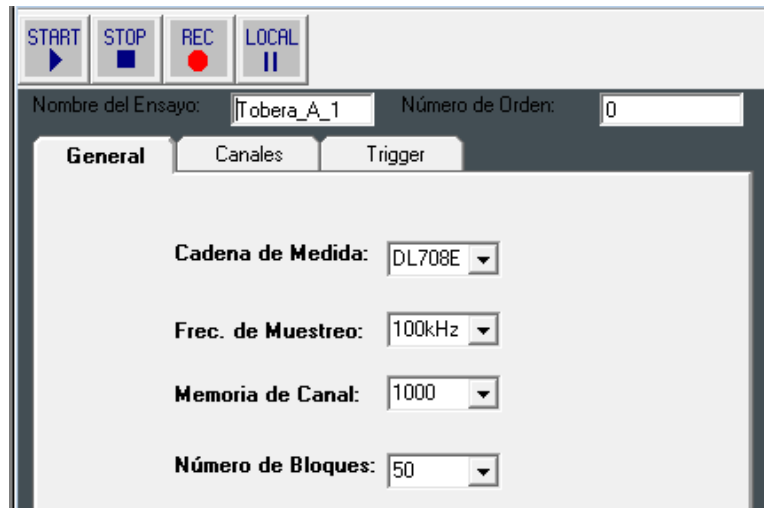


Figura 4. 3. Interfaz del software YOKO

De forma excepcional, para este ensayo se ha añadido un canal adicional de almacenamiento en el YOKO DL716 para la medida de la corriente real enviada desde el Genotec al inyector, de forma que se compare con la corriente enviada desde el magnetinyector V2 y se asegure el correcto funcionamiento del aparato. Para ello se hace uso de las pinzas amperimétricas explicadas en el apartado 3.4.6 del capítulo anterior.

4.2.3. XBALANCIN

Este programa, desarrollado previamente en el CMT, se encarga de mostrar los datos de masa de combustible que va midiendo la balanza en tiempo real. Se debe de fijar la frecuencia con la que se quiere que tome datos de la balanza. Para los ensayos de tasa se pone la frecuencia igual a la frecuencia de trigger o disparo (10Hz), ya que la lectura que nos da es en miligramos de combustible por cada cilindro (inyector) y ciclo (inyección), mg/cc.

Con la medida de la masa real inyectada se consigue verificar que las medidas de tasa tomadas en el YOKO DL716, a partir de sensores de presión, son equivalentes a las tasas inyectadas reales.

En la figura 4.4 se muestra la pantalla del software.

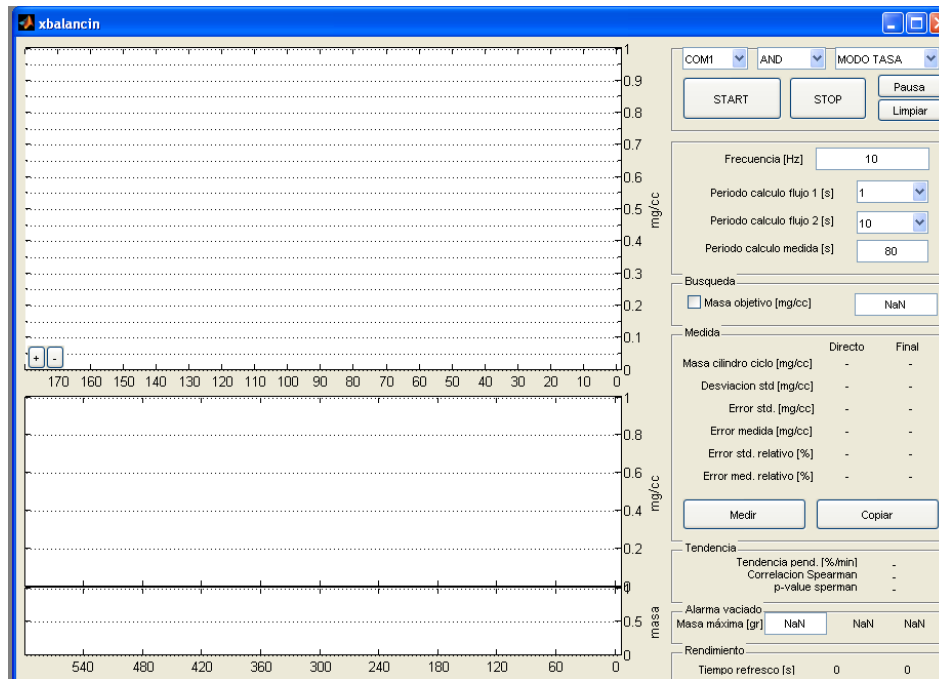


Figura 4. 4. Interfaz del software *xbalancin*

4.2.4. XTASUTILES

Este programa, también desarrollado en el CMT, es el encargado de organizar cada archivo que se genera por cada una de las 50 muestras en diferentes carpetas. También se encarga de procesar los datos traduciéndolos, para posteriormente graficarlos.

Las figuras 4.5 y 4.6 muestran la ventana de trabajo con algunos de los archivos procesados durante el proyecto y el conjunto de gráficos obtenidos para un punto en concreto, respectivamente.

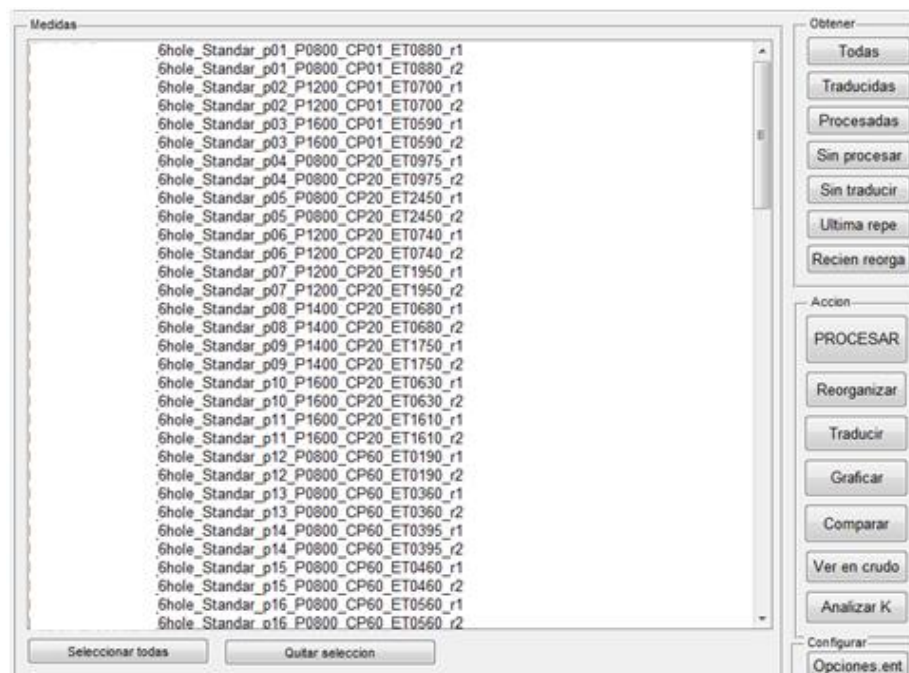


Figura 4. 5. Interfaz del software *xtasutiles*

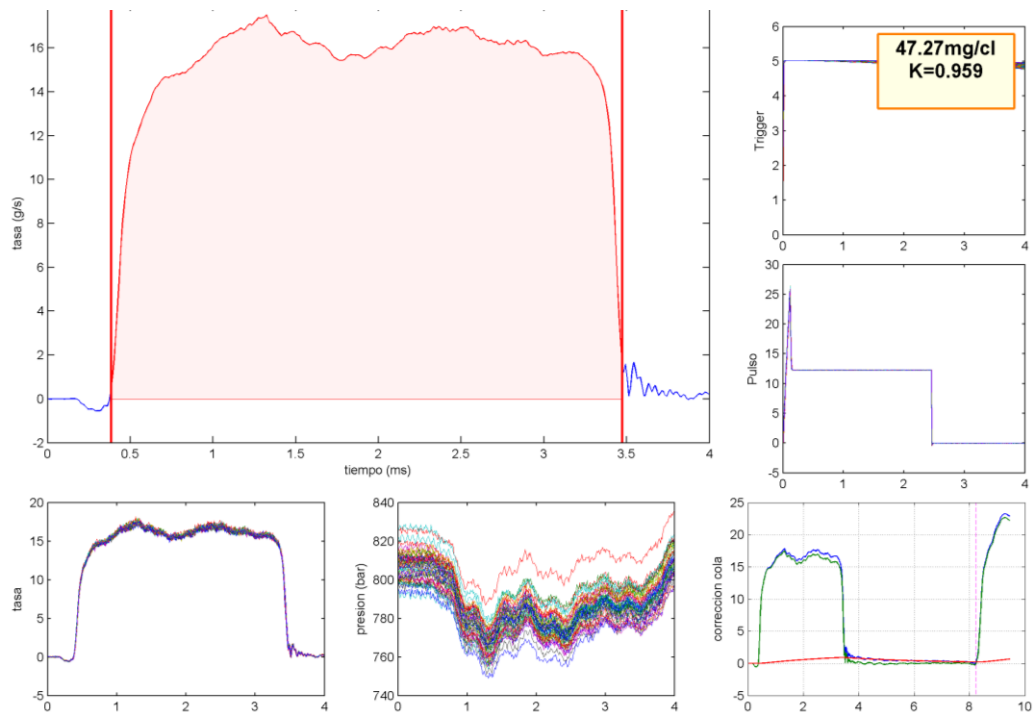


Figura 4. 6. Graficación datos de tasa

La ventana central y la inferior izquierda de la figura 4.6 son las ventanas principales, y representan la tasa inyectada promedio y de cada una de las 50 medidas tomadas, respectivamente. En cuanto al resto de ventanas se tiene, la señal de presión de cada muestra tomada por el sensor de presión del raíl en la parte central inferior, la señal de disparo o de trigger en la esquina superior derecha, la señal de pulso que se envía a través del Genotec en la ventana central derecha, y la corrección de cola, que trata de corregir efectos de acumulación en el tasímetro, en la esquina inferior derecha.

4.2.5. HOJA DE CÁLCULO

En la hoja de cálculo se irán tabulando para cada ensayo de tasa los valores del “xbalancin” y temperatura. Sobre ella se registrarán valores como la presión de inyección, el tiempo de energetización, la contrapresión en la maqueta, la masa objetivo, las temperaturas del tasímetro, del depósito, del retorno y del inyector, la frecuencia de inyección, y los valores medidos en el programa xbalancin.

La figura 4.6 muestra un ejemplo de las dos medidas realizadas para el primer punto del plan de ensayos de la tobera A.

4.3. PROCEDIMIENTO

Para la medida de tasa inicialmente se establece la presión de inyección, contrapresión y tiempo de energetización objetivo. Posteriormente se inicia el software “xbalancin” con la frecuencia de muestreo de 10 Hz y se espera un tiempo hasta que estabilice la medida. En ese momento se toman simultáneamente los datos del xbalancin, de la cadena de adquisición de datos, y del programa de tratamiento de datos. Finalmente se apuntan los valores obtenidos del “xbalancin” y temperaturas necesarias en la hoja de cálculo (tabla 4.1).

Nombre medida	EUROPEO_A_Standard_p01_P0800_C P01_ET0880_r1	EUROPEO_A_Standard_p01_P0800_C P01_ET0880_r2
Proyecto	EUROPEO	EUROPEO
Tobera	A	A
Combustible	Standard	Standard
Punto	1	1
Repetición	1	2
Numero de pulsos	1	1
DT1 [µs]	500	500
Masa objetivo [mg/cc]	22	22
ET1 [µs]	880	880
Presión inyección objetivo [bar]	800	800
Contrapresión objetivo [bar]	1	1
Contrapresión medida [bar]	1,5	1,5
TEVI [°C]	52	53
Tdeposito [°C]	35	35
Tretorno [°C]	52	52
Tportainyector [°C]	70	70
Frecuencia [Hz]	10	10
Periodo calculo [s]	80	80
Gasto Masico [g/s]	0,218537	0,219408
Desviación std. [mg/cc]	2,23987	2,16947
Error Estandar [%]	1,14592	1,10549
Error Relativo [%]	0,227892	0,281776
Masa medida [mg/cc]	21,8537	21,9408
Error entre Repeticiones		0,396977321

Tabla 4. 1. Datos de tasa en la hoja de cálculo

Se realizan dos repeticiones por cada punto para confirmar que el ensayo está bien realizado. Uno de los criterios para considerar la medida de un punto como válida es que la el error que hay entre las repeticiones 1 y 2 sea menor que el 1%. El otro criterio es que el factor de dispersión K, definido en el apartado 4.2.1.4, se encuentre en el intervalo [0,9-1,1].

4.3.1. SEÑAL DE TASA

De las 6 gráficas obtenidas al procesar, mediante el xtasutiles, las medidas tomadas por el YOKO DL716, las que realmente representan los resultados buscados son las ampliadas en las figuras 4.7 y 4.8. El resto son únicamente parámetros de control necesarios para conocer el estado real durante la inyección medida.

En la figura 4.7 se muestran las 50 señales obtenidas con el tasímetro para un mismo punto de funcionamiento, mientras que en la figura 4.8 se muestra el promedio de las 50 señales anteriores. Se trata de las dos ventanas principales de la figura 4.6, pues son realmente los datos medidos. El resto son únicamente parámetros de control.

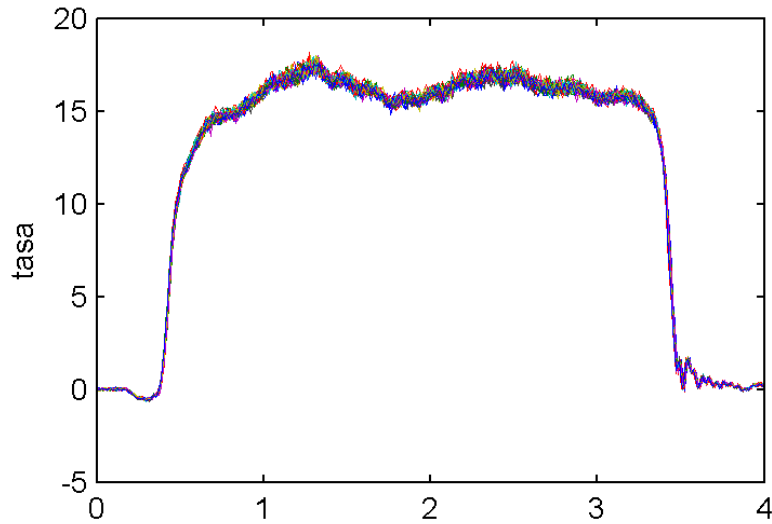


Figura 4. 7. Gráfico de las 50 señales de tasa

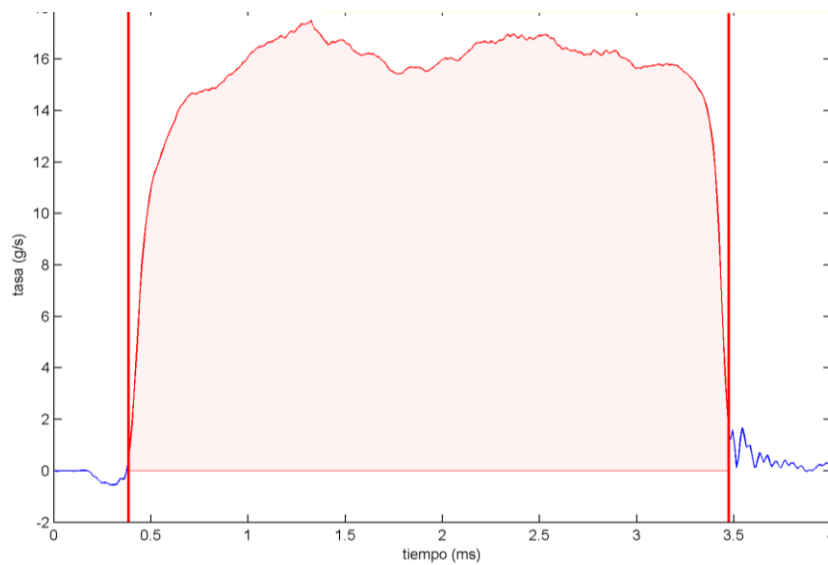


Figura 4. 8. Gráfico del promedio de las 50 señales de tasa

De esta forma, se puede determinar el área bajo la curva para cada ciclo (ecuación 4.1), que representa la masa inyectada durante el tiempo que dura la inyección. Los límites de integración son las dos líneas rojas verticales de la figura 4.8. [9], [10]

$$m = \int \frac{dm}{dt} dt \quad (4.1)$$

4.4. PLAN DE ENSAYOS

El plan de ensayos para la medida de tasa se va a realizar sobre dos toberas distintas (figura 4.9):

- Tobera A: 6 orificios, diámetro nominal DN140 μm
- Tobera B: 4 orificios, diámetro nominal DN170 μm

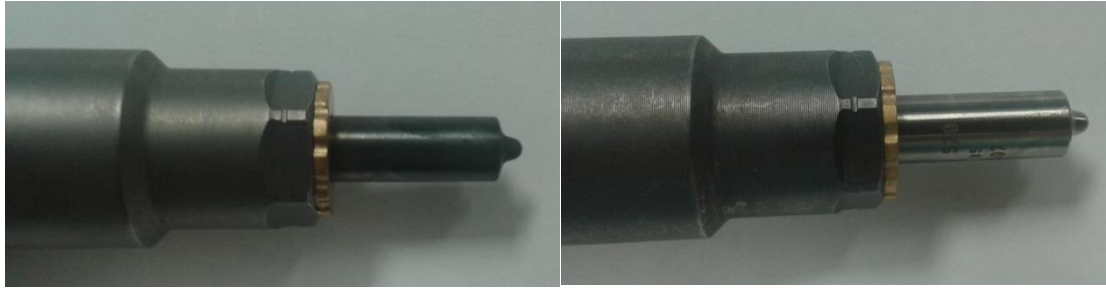


Figura 4. 9. Fotografías de la tobera A (izquierda) y B (derecha)

Las restricciones o condiciones de contorno impuestas por la dirección europea del proyecto son las mismas para ambas toberas:

- La temperatura del depósito debe de ser aproximadamente de 35°C.
- La temperatura del porta-inyector va a ser de aproximadamente 70°C.

Sin embargo, en cuanto al plan de ensayos, cada tobera posee su propio plan, por lo que se explicarán ambos por separado:

- Tobera A: se miden un total de 46 puntos, cuyas presiones de inyección (Piny), contrapresiones en la maqueta (CP) y rangos de tiempos de energetización (ET) se recogen en la tabla 4.2.
- Tobera B: se miden un total de 14 puntos. En este caso el plan de ensayos se recoge en la tabla 4.3.

Piny [bar]	CP [bar]	ET [μ s]	Puntos	
800	1	880	1	
	20	975, 245	2	
	60	[190, 4240]	7	
	100	350, 88	2	
1000	60	[190, 3740]	8	
1200	1	880	1	
	20	740, 1950	2	
	60	[170, 3370]	7	
	100	315, 685	2	
1400	20	680, 1750	2	
1600	1	590	1	
	20	630, 1610	2	
	60	[150, 2880]	7	
	100	293, 585	2	
			46	Total

Tabla 4. 2. Plan de ensayos tobera A

Piny [bar]	CP [bar]	ET [μ s]	Puntos	
800	60	380, 850	2	
1000	60	[210, 3460]	8	
1200	60	375, 850	2	
1600	60	365, 855	2	
			14	Total

Tabla 4. 3. Plan de ensayos tobera B

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

En este último capítulo se procede a la presentación y análisis de los resultados obtenidos en la medida de tasa. Se estudia la influencia de los distintos parámetros que influyen en la cantidad de diesel inyectada, así como las diferencias existentes entre ambas toberas. Por último, se exponen resumidamente las conclusiones deducidas a lo largo del capítulo.

5.2. SEÑAL DE TASA

La figura 5.1 representa la señal de tasa obtenida tras el correspondiente procesado. Las gráficas obtenidas representan la corriente del pulso (A), la presión de inyección (bar) y la masa inyectada (g/s) en función del tiempo (ms).

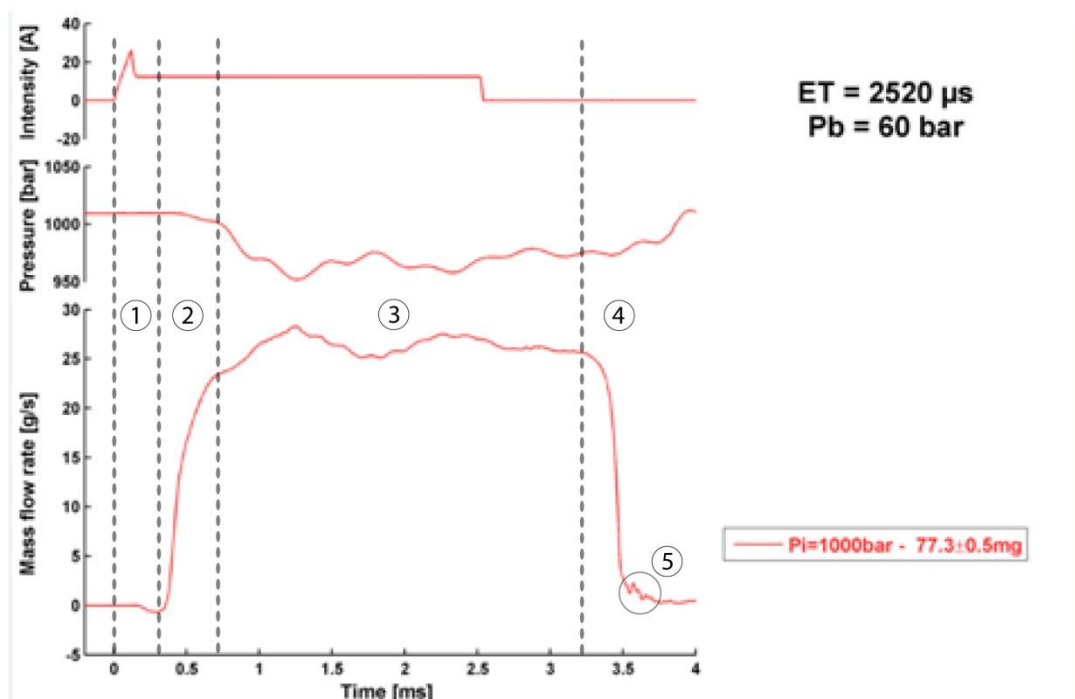


Figura 5. 1. Medida de tasa de la tobera B para $P_{inj}=1000$ bar, $P_b=60$ bar, $ET=2520$ µs

En la parte superior aparece la señal de pulso enviada al Genotec, ya descrita en el apartado anterior, con un pico de poca duración y un tiempo de energización cuya finalidad es actuar sobre la aguja del inyector para que deje salir combustible hacia el interior del cilindro.

La gráfica central corresponde a la evolución de la presión con el tiempo. Se observa que al iniciarse la inyección, la presión instantánea es inferior a la presión objetivo. Esto es debido a

que se produce un desalojo de masa hacia el cilindro o tasímetro, produciendo una caída de presión instantánea en el raíl. La presión se recupera cuando el regulador de presión actúa para compensar esta pérdida y/o cuando finaliza la inyección. Además, este valor fluctúa armónicamente a lo largo de la inyección.

La gráfica inferior representa la medida de tasa en sí. Se pueden distinguir claramente tres etapas de inyección:

- Una primera fase de apertura (2), en la cual la cantidad inyectada aumenta rápidamente hasta alcanzar la tasa correspondiente.
- Una vez se alcanza la tasa de referencia, aparece una etapa estacionaria (3) en la cual la masa inyectada permanece constante durante cierto tiempo. Esta etapa está directamente relacionada con el tiempo de energización y con el área de los orificios de la tobera.
- Al finalizar la corriente del pulso la aguja de la tobera cierra (4), produciéndose un rápido descenso de la tasa hasta llegar a valores prácticamente nulos.

Paralelamente a las tres etapas explicadas, en la gráfica aparecen una serie de efectos característicos de cualquier ciclo de inyección:

- Los inicios de la corriente y de la inyección no son simultáneos. La inyección se inicia unos instantes después del pulso debido al tiempo necesario para que la corriente llegue a la bobina del inyector, se abra la aguja de la tobera y se empiece a inyectar diesel. Este fenómeno es conocido como retraso hidráulico (1).
- La tasa medida fluctúa de forma similar a la onda de presión, aunque con un cierto desfase. Así, se observa que los mínimos de la señal de presión aparecen también en la señal de tasa aproximadamente unos 0.5 ms después.
- La señal de flujo másico sufre un fenómeno de acumulación (5) debido a una variación presión y de temperatura en el interior de la cámara. Además, la señal se queda cargada al final, es decir, cuando el inyector cierra la aguja y deja de inyectar, se sigue midiendo un valor de tasa distinto de 0, que no debería de ser así. Este "offset" que se queda cargado al final es debido a dos razones. La primera es el aumento de presión en la cámara provocado por la propia inyección. Hay que recordar que el sensor empleado es en realidad un sensor de presión y que por lo tanto cualquier variación de presión que se produzca en la cámara es registrada por el sensor, y sumada a la propia señal. La segunda razón es que el sensor se queda cargado eléctricamente. Este fenómeno se corrige mediante el procesado de la señal, tal y como se explica en [9] y [10].

Por último, señalar que el valor de 77.3 mg corresponde al valor total de masa inyectada en el ciclo, resultado obtenido al aplicar la integral del área definida bajo la señal (ecuación 4.1) y corregirla con la masa medida con la balanza de precisión aguas abajo del tasímetro.

5.3. INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE INYECCIÓN

A continuación se analiza la influencia de la presión de inyección en la tasa inyectada. En la figura 5.2 se representa la señal de tasa medida en la tobera A para tres presiones de inyección distintas, ante iguales tiempos de energización y contrapresiones. Se observa que para igual

contrapresión y tiempo de energetización, a mayor presión de inyección mayor cantidad inyectada.

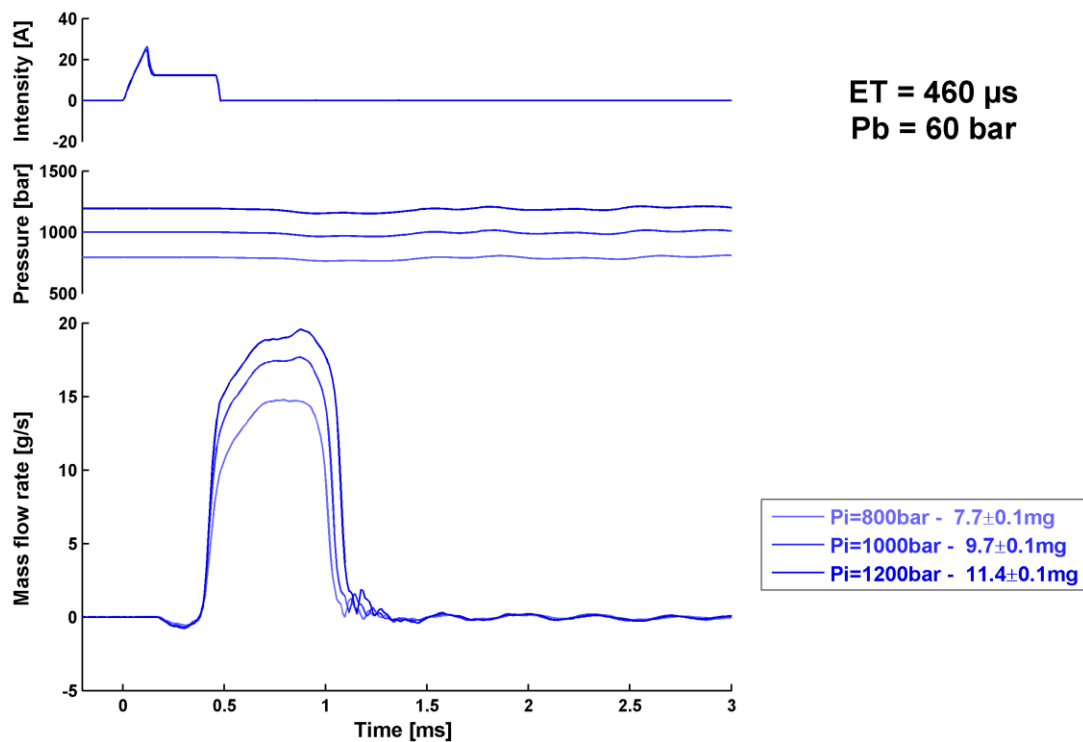


Figura 5. 2. Comparación tasa inyectada en la tobera A para CP=60 bar, ET=460 μs, y Piny=800,1000,1200 bar

Pese a que únicamente se representa una figura de la tobera A, las conclusiones obtenidas son extrapolables para la tobera B.

El fundamento teórico de este hecho se explica mediante la siguiente ecuación:

$$m = Cd \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p} \quad (5.1)$$

donde

m = masa inyectada por unidad de tiempo (g/s)

Cd = coeficiente de descarga de la tobera (adimensional)

A = sección total orificios tobera (m²)

ρ = densidad del combustible (kg/m³)

Δp = Piny-CP = variación de presión (bar)

Así, a mayor presión de inyección mayor es la diferencia de presiones entre el raíl y el tasímetro o cilindro y, por tanto, mayor es la cantidad de masa inyectada.

5.4. INFLUENCIA DE LA CONTRAPRESIÓN EN EL CILINDRO

En este apartado se analiza el efecto de la contrapresión en el interior del cilindro sobre la tasa inyectada. Se adjuntan dos figuras comparando distintas contrapresiones para cada tobera. La figura 5.3 compara dicho efecto en la tobera A, mientras que la figura 5.4 lo hace sobre la B.

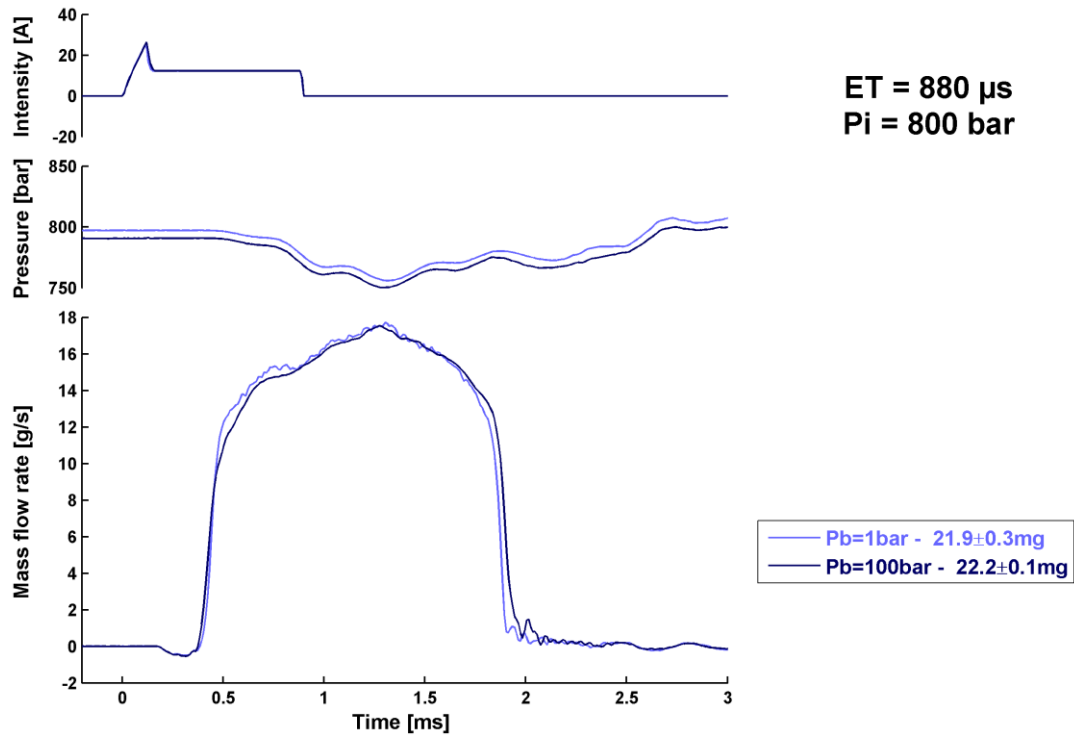


Figura 5. 3. Comparación tasa inyectada en la tobera A para Piny=800 bar, ET=880 μ s, y CP=1,100 bar

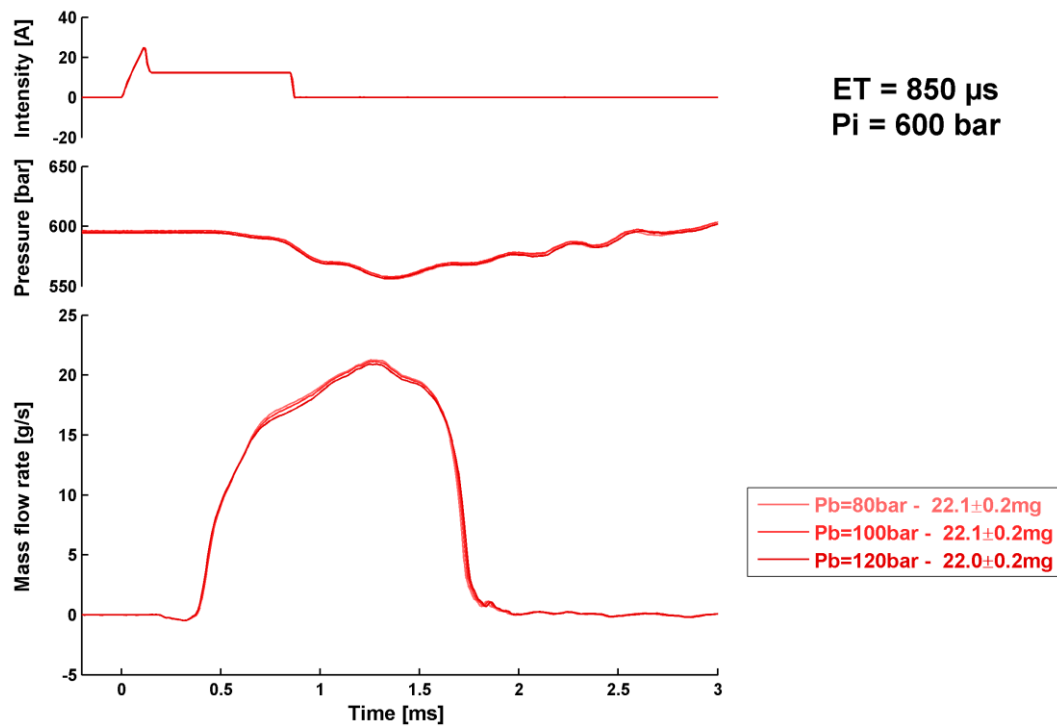


Figura 5. 4. Comparación tasa inyectada en la tobera B para Piny=600 bar, ET=850 μ s, y CP=80,100,120 bar

En este caso, el efecto de la contrapresión es opuesto al de la presión de inyección. A mayor contrapresión menor tasa inyectada, aunque en este caso la reducción de tasa es mucho menor o incluso nula como en el caso de la tobera A.

De la ecuación 5.1, se extrae que a mayor contrapresión menor es la diferencia de presiones y, por tanto, menor es la masa inyectada. Sin embargo, debido a que la diferencia entre las contrapresiones estudiadas ($\Delta CP=120-80=40$ bar) es hasta 10 veces menor que la comparación entre presiones de inyección ($\Delta P_{iny}=1200-800=400$ bar), su efecto también es mucho más bajo.

Por otro lado, se observa como a menor contrapresión el cierre de la aguja y, por tanto, fin de la inyección, ocurre más rápido. Este efecto se observa de forma más clara en la figura 5.3, donde la pendiente de la gráfica azul claro es más pronunciada que la azul oscuro.

5.5. INFLUENCIA DEL TIEMPO DE ENERGETIZACIÓN

El tiempo de energetización se define como el tiempo de duración la inyección. En este caso la relación es trivial, a igualdad de presiones, cuanto mayor sea el pulso eléctrico mayor será la cantidad inyectada.

Las figuras 5.5 y 5.6 confirman esta relación para las toberas A y B respectivamente. Representan las medidas de tasa para multitud de tiempos de energetización ante una presión de inyección de 1000 bar y una contrapresión de 60 bar.

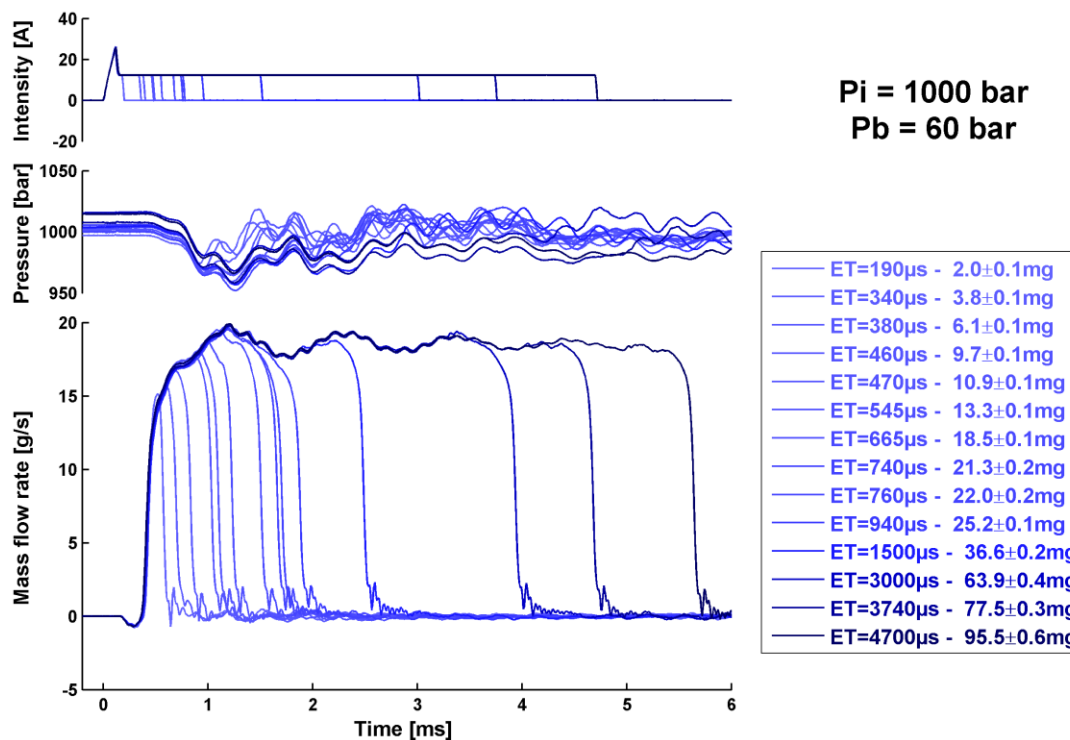


Figura 5. 5. Comparación tasa inyectada en la tobera A para $P_{iny}=1000$ bar y $C_p=60$ bar ante distintos tiempos de energetización

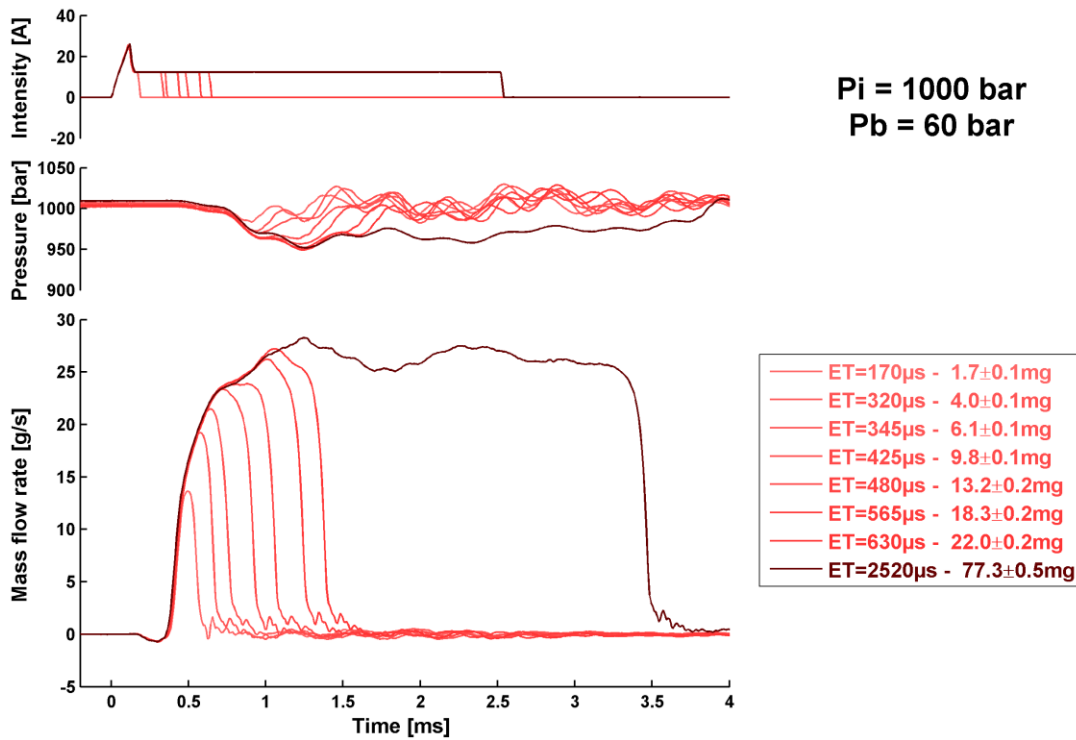


Figura 5. 6. Comparación tasa inyectada en la tobera B para Piny=1000 bar y Cp=60 bar ante distintos tiempos de energización

Respecto a la señal de presiones, además de las reducciones y las fluctuaciones descritas en el apartado 5.2, en estas figuras se puede observar la recuperación del valor de consigna tras finalizar la inyección en el caso de las inyecciones más cortas (líneas más claras). Esta recuperación se produce también mediante fluctuaciones estabilizadas progresivamente hasta el valor de consigna. Las inyecciones con elevados tiempos de energización también recuperarán la presión perdida pero en tiempos superiores a los graficados, por lo que no se puede observar.

5.6. COMPARACIÓN ENTRE TOBERAS

Por último se analiza cómo afecta el tipo de tobera a la medida de tasa. Los parámetros que varían dependiendo de la tobera son el coeficiente de descarga, el número de orificios, y el diámetro nominal de estos.

A partir de la ecuación 5.1 se concluye que ante iguales presiones de inyección, contrapresiones, combustible utilizado y coeficiente de descarga, la masa inyectada únicamente depende del área total efectiva de los orificios. Esta área se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot N_{ori} \quad (5.2)$$

donde

A = área total efectiva (m²)

d₀ = diámetro unitario de los orificios (m)

N_{ori} = número de orificios de la tobera

Según catálogo del fabricante, la tobera A (III_6hole) posee 6 orificios de 140 μm de diámetro nominal, por lo que según la ecuación 5.2 tiene un área efectiva de 0,092 mm^2 . La tobera B (IV_4hole), por su parte, tiene 4 orificios de 170 μm de diámetro nominal y, por tanto, un área efectiva de 0,091 mm^2 . Así, teóricamente la cantidad de masa inyectada por ciclo debería ser la misma.

La figura 5.7 representa la medida de tasa de un punto determinado para ambas toberas. Se observa que la tobera A (gráfica azul) inyecta casi un 30% menos pese a que la presión de inyección es incluso ligeramente superior a la de la tobera B.

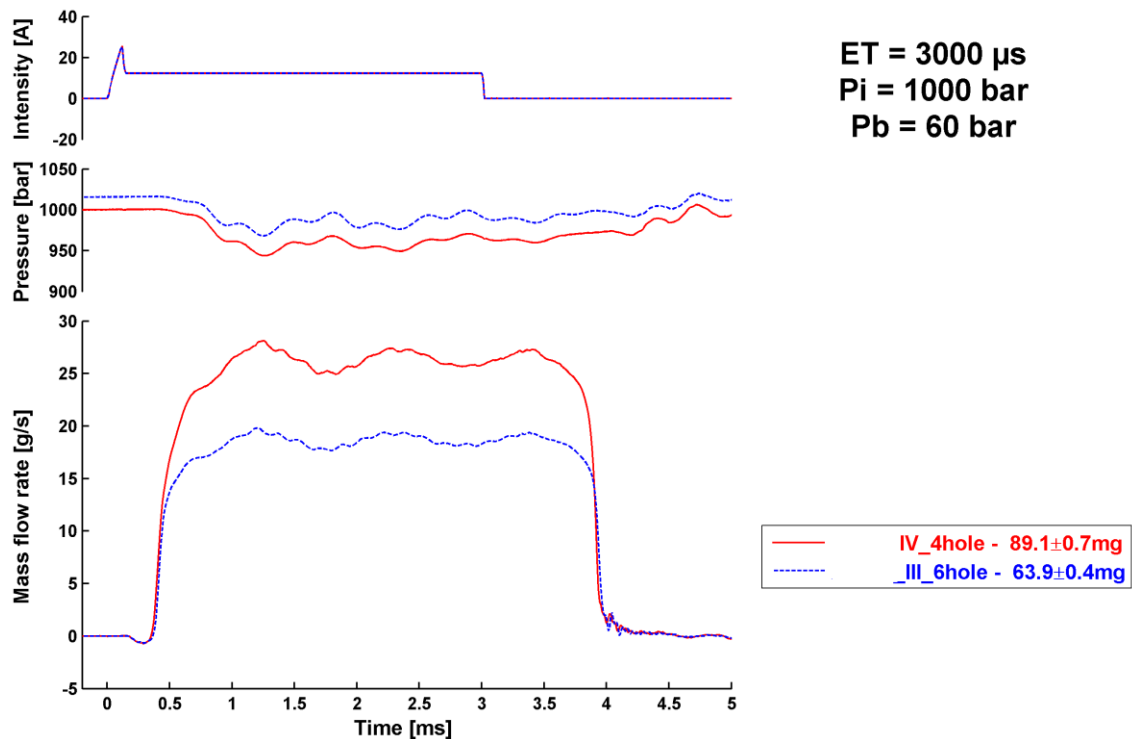


Figura 5. 7. Comparación tasa inyectada en la toberas A (azul) y B (rojo) para $P_{iny}=1000$ bar, $C_p=60$ bar y $ET=3000$ μs

La figura 5.8 es un resumen del comportamiento descrito en la figura 5.7 para diferentes tiempos de energización. Efectivamente, se observa cómo la gráfica azul correspondiente a la tobera A se encuentra siempre por debajo de la gráfica roja (tobera B), lo que se traduce en una reducción importante de la masa inyectada.

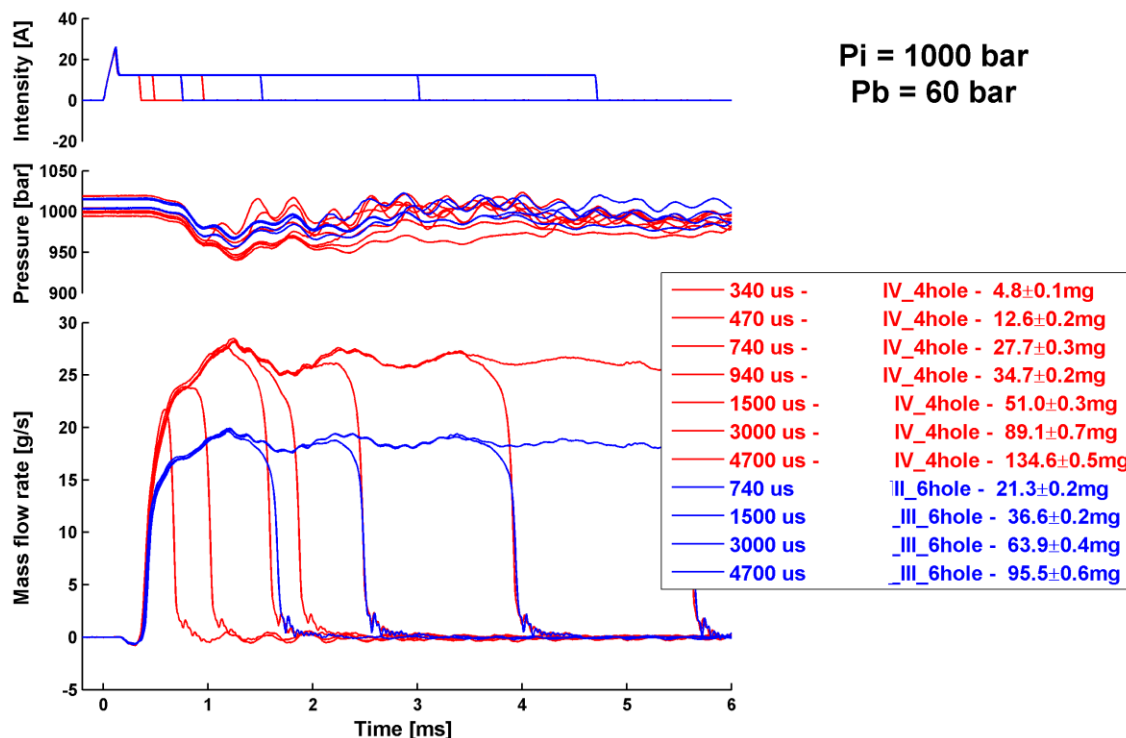


Figura 5. 8. Comparación tasa inyectada en la toberas A (azul) y B (rojo) para Piny=1000 bar y Cp=60 bar para distintos tiempos de energización

Para contrastar este resultado anómalo se analiza el comportamiento para todos los puntos de medida de ambas toberas correspondientes a una presión de inyección de 1000 bar y una contrapresión de 60 bar. La tabla 5.1 y la figura 5.9 reflejan la masa inyectada de cada tobera para distintos tiempos de energización. Como ocurre con las figuras 5.7 y 5.8, la tobera B (gráfica roja) inyecta mayor tasa que la A. Además, se observa que este efecto es más acentuado para mayores tiempos de energización.

Piny=1000 bar, CP=60 bar								
Tobera A	ET	340	470	740	940	1500	3000	4700
	m	4,67	10,85	21,26	25,40	36,73	63,79	95,75
Tobera B	ET	340	470	740	940	1500	3000	4700
	m	4,79	12,55	27,67	34,57	50,67	88,92	134,44

Tabla 5. 1. Masa inyectada en función del tiempo de energización para Piny=1000 bar y CP=60 bar

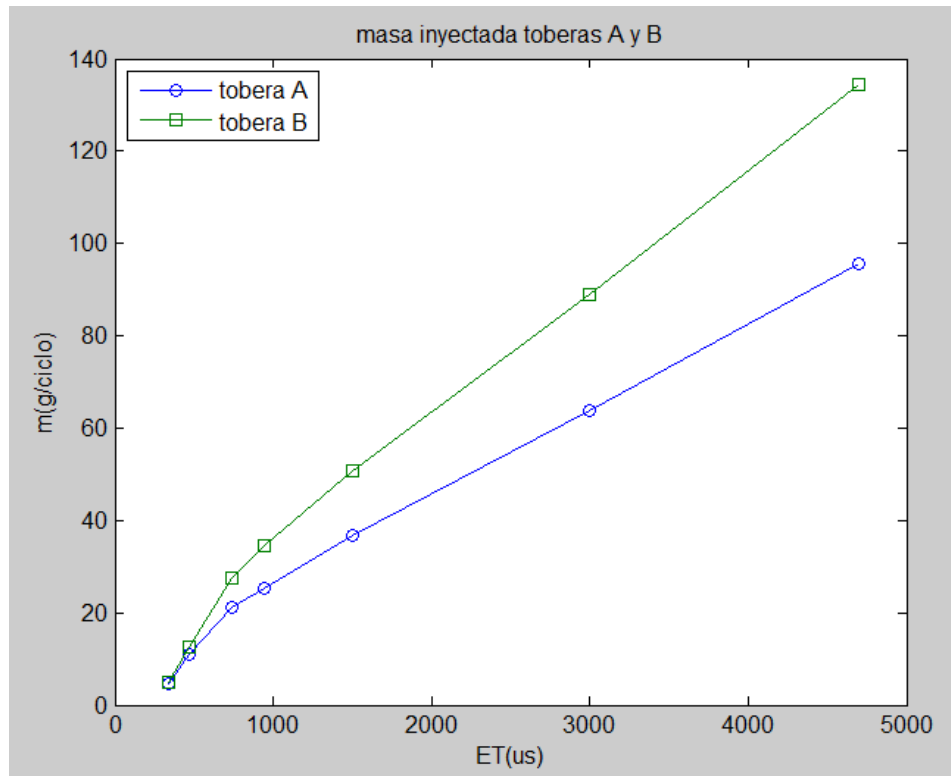


Figura 5. 9. Masa inyectada en función del tiempo de energización para Piny=1000 bar y CP=60 bar

Como se ha expuesto al inicio del apartado, la única diferencia posible entre ambos ensayos debe ser por razones geométricas. El área efectiva de la tobera A debe ser menor que la de la tobera B.

5.7. MEDIDA DEL DIÁMETRO REAL EN MICROSCOPIO

Con el objetivo de analizar las posibles diferencias geométricas entre ambas toberas se realizan una serie de fotografías mediante un microscopio lupa, ya que los orificios de la tobera tienen un orden de magnitud de unas 100 micras. Se pretende determinar cuál es el diámetro real de estos orificios y si éste es realmente la causa de los resultados obtenidos. En este apartado se procede a explicar el procedimiento seguido para el procesado de las imágenes obtenidas y las conclusiones extraídas.

5.7.1. FOTOGRAFÍAS MEDIANTE MICROSCOPIO LUPA

Mediante un microscopio lupa perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia se toman fotografías de 2 orificios de cada tobera a distintos tamaños de escala. Se realizan un total de 7 fotografías para la tobera A y 4 para la tobera B.

Las figuras 5.10 y 5.11 corresponden a fotografías tomadas a distinta escala de los orificios 1 y 3 de la tobera A.

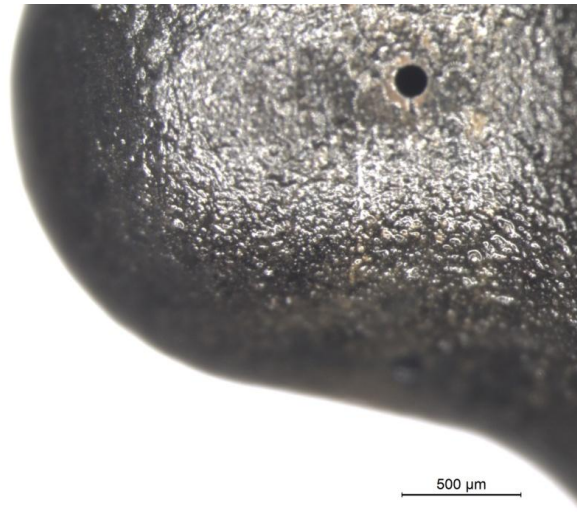


Figura 5. 10. Fotografía del orificio 1 de la tobera A a escala 500 μm

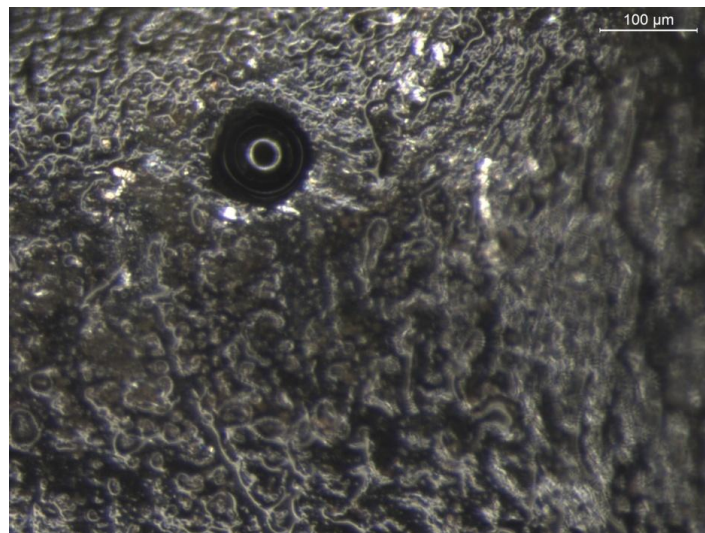


Figura 5. 11. Fotografía del orificio 4 de la tobera A a escala 100 μm

Por su parte, las figuras 5.12 y 5.13 son fotografías del orificio 1 de la tobera B.

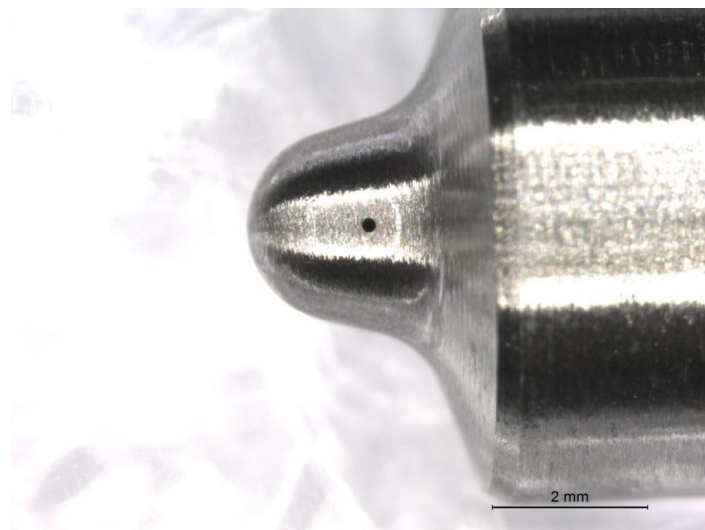


Figura 5. 12. Fotografía del orificio 1 de la tobera B a escala 2 mm

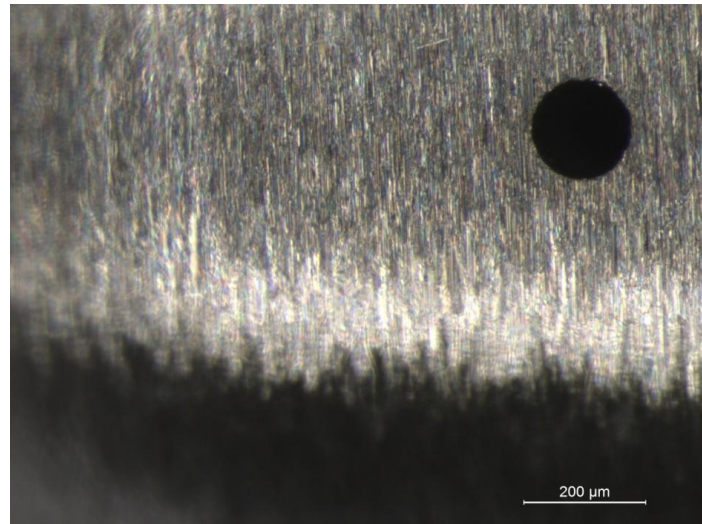


Figura 5. 13. Fotografía del orificio 1 de la tobera B a escala 200 μm

A primera vista se observa que la tobera B se encuentra en mejor estado, con el material pulido y el perímetro del orificio más regular. La tobera A, por su parte, presenta una superficie más gastada y con posible acumulación de depósitos.

5.7.2. PROCESADO DE LAS IMÁGENES

A partir de la función en matlab *diametroLupa*, desarrollada previamente el CMT, se procede a calcular el diámetro real de los orificios. La figura 5.14 muestra parte de la programación de esta función.

```

1  function diametroLupa(ImgFile)
2
3  %ImgFile = 'Evolet_III_ori1_x063.jpg' --> is the filename
4  %ImgFile puede contener varios nombres png también
5  %si el input está vacío, la función lee todos los posibles jpg que hay en
6  %la carpeta de trabajo
7  %
8  % 2015.05 GB
9
10 |
11 if nargin < 1
12     file = getarchivos('*.*jpg'); %'Evolet_III_ori1_x063.jpg';
13 else
14     file = ImgFile;
15 end
16
17 [Z1,Z2] = size(file);
18
19 if Z1 == 1
20     file = {ImgFile};
21 end
22
23 for j=1:length(file)
24     Iml = imread(file{j});
25     Hfig = figure;
26     imshow(Iml,[])
27

```

Figura 5. 14. Parte de la programación de la función *diametroLupa* en matlab

El procedimiento a seguir para la medida del diámetro consiste en 5 pasos:

- Llamada de la función *diametroLupa* con el nombre de la imagen a procesar como variable. En la figura 5.15 'Tobera_A_ori5x063.jpg'.
- Introducción del tamaño de escala de la fotografía en μm . En la figura 5.15 la escala es de 200 μm .
- Selección de los dos puntos que señalan los límites de la escala en la fotografía. Recta blanca que aparece en la esquina inferior derecha de la figura 5.16.
- Selección de tres puntos opuestos pertenecientes al perímetro del orificio. Señales rojas de la figura 5.16.
- Selección de tres nuevos puntos opuestos al diámetro del orificio. Señales azules de la figura 5.16.

```
Command Window
>> open diametroLupa()
>> cd C:\Users\eroski\Desktop\GIE\TFG\Proyecto_evolet_bosch\Microscopio
>> diametroLupa('Tobera_A_ori4_x100.jpg')
Warning: Image is too big to fit on screen; displaying at 25%
> In imuitools\private\initSize at 73
  In imshow at 262
  In diametroLupa at 26
Type the photo scale [um] = 100
Select the scale line points (2 points)
Select 3 points of the circle diameter(2 opposite points)
Again, Select ANOTHER 3 points of the circle diameter(2 opposite points)
fx >>
```

Figura 5. 15. Ventana de comandos de matlab

Again, Select ANOTHER 3 points of the circle diameter(2 opposite points)

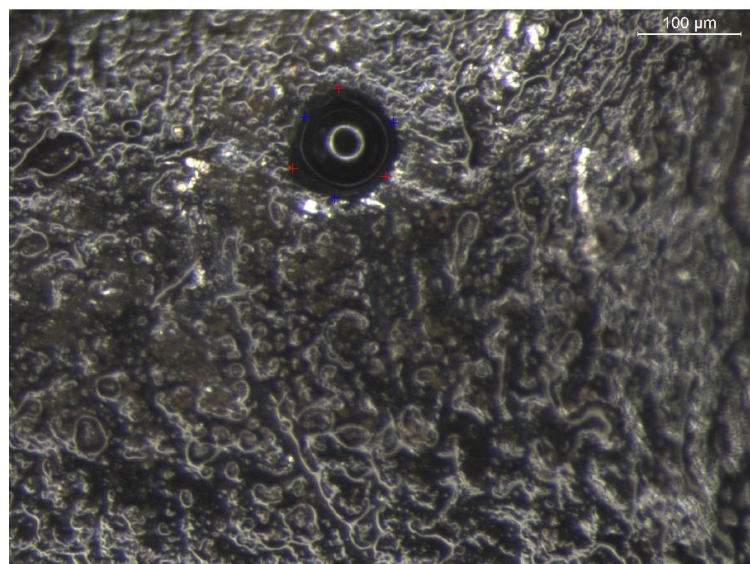


Figura 5. 16. Señales perimetrales del orificio 4 de la tobera A a escala 200 μm

Tras la realización de estos pasos, la propia función *diametroLupa* calcula directamente el diámetro de las dos circunferencias que describen los dos conjuntos de tres puntos señalados sobre el perímetro del orificio. Así, se genera un archivo .sdat con la información que aparece en la figura 5.17:

```

scale_um = 100
scale_pix = 354.0094191522762
ratio_pix_um = 3.540094191522762
points1_x_pix = 918.0761381475668      349.9317111459973
points1_y_pix = 1049.30376766091      673.4230769230771
points2_x_pix = 777.6930926216639      444.5376766091056
points2_y_pix = 1082.873626373626      444.5376766091056
diameter1_um = 108.6220328313208
diameter2_um = 104.6031317026665
    
```

Figura 5. 17. Información del fichero 'Tobera_A_ori5x063.sdat' generado

5.7.3. RESULTADOS

En las tablas 5.2 y 5.3 se recoge el resumen de los resultados obtenidos en cada uno de los 11 ficheros .sdat generados. En ellas se especifica la escala y el diámetro de cada fotografía, el promedio de todos los diámetros medidos para cada orificio, y el promedio de todos los orificios de cada tobera.

Así, se obtiene que la tobera A tiene un diámetro real de unos 121,5 µm frente a los 150 µm nominales. Por su parte, en la tobera B se mide un diámetro real alrededor de los 160 µm, siendo su diámetro nominal de 170 µm.

ORIFICE 1		Promedio		ORIFICE 4		Promedio	
1	scale_um 200,0	132,4	µm	1	scale_um 1000,0	110,6	µm
	diameter1_um 137,6				diameter1_um 115,2		
	diameter2_um 135,8				diameter2_um 107,9		
2	scale_um 500,0	2	scale_um 500,0				
	diameter1_um 127,5		diameter1_um 125,6				
	diameter2_um 128,9		diameter2_um 116,6				
3	scale_um 200,0			3	scale_um 100,0		
	diameter1_um 131,4				diameter1_um 108,6		
	diameter2_um 133,3				diameter2_um 104,6		
				4	scale_um 100,0		
					diameter1_um 106,4		
					diameter2_um 100,2		
PROMEDIO						121,5	µm

Tabla 5. 2. Resumen de resultados diámetro tobera A

ORIFICE 1			Promedio		ORIFICE 3			Promedio		
1	scale_um	2000,00	160,37	µm	1	scale_um	2000,00	158,06	µm	
	diameter1_um	157,43				diameter1_um	155,38			
	diameter2_um	154,85				diameter2_um	154,03			
2	scale_um	200,00				2	scale_um			200,00
	diameter1_um	164,90				diameter1_um	158,78			
	diameter2_um	164,32				diameter2_um	164,03			
PROMEDIO								159,22	µm	

Tabla 5. 3. Resumen de resultados diámetro tobera B

Como los diámetros reales de las toberas son menores a los nominales, también lo será su área efectiva. Así, siguiendo la ecuación 5.2, la tobera A tiene un área de 0,074 mm², mientras que el área de la tobera B será de 0,079 mm², ambas mucho menores que los 0,092 mm² nominales.

Pese a que el área efectiva calculada para la tobera A es menor que la tobera B, la diferencia entre ambas no es lo suficientemente grande como para que se produzcan medidas de tasa tan distintas.

En general el orificio de las toberas tiene un diámetro interior mayor o igual que el nominal, de forma que el diámetro interno no sea un factor limitante durante la inyección. El diámetro medido con la técnica del microscopio es el exterior, por lo que una posibilidad es que realmente presente problemas el diámetro interior, pudiendo llegar incluso a ser menor el diámetro interior que el exterior y disminuyendo el coeficiente de descarga real de la tobera.

El hecho de que esto sólo ocurra la tobera A es debido a que no se trata de una tobera nueva sino que antes de los ensayos ha sido previamente testada en el motor, pudiendo contener deposiciones sólidas por partículas residuales debido a la combustión. La tobera B, en cambio, únicamente ha sido utilizada para los ensayos de medida de este proyecto, por lo que se encuentra en mejor estado.

5.8. CONCLUSIONES

A lo largo del trabajo se ha ido exponiendo todo el proceso de caracterización hidráulica de un inyector solenoide para motores dual fuel, pero ha sido en este último capítulo donde se han analizado realmente las características de este inyector.

A continuación se resume la influencia de los distintos parámetros que afectan a la operación del inyector, como son la presión de inyección, la contrapresión en el cilindro, el tiempo de energización, y el tipo de tobera:

- La presión de inyección es una variable que afecta de forma directamente proporcional a la medida de tasa. A mayor presión de inyección mayor masa inyectada por cada ciclo. Además, su efecto es relativamente importante por el amplio rango de presiones a los que puede trabajar un common-rail convencional.
- La contrapresión afecta de modo inversamente proporcional. Esto es, a mayor presión en el interior del cilindro menor es la masa que se puede inyectar. Sin embargo,

debido a que las contrapresiones no suelen variar en exceso unas de otras, el efecto producido es prácticamente despreciable.

- El tiempo de energetización es, sin duda, el parámetro que más influye en cuanto a la medida de tasa. Como se ha explicado anteriormente su efecto es directo, cuanto más tiempo se inyecte diesel mayor cantidad se inyectará. Al mismo tiempo es una variable fundamental para el control de las emisiones de contaminantes. Tiempos de energetización excesivamente cortos o largos producirán combustiones incompletas, con sus respectivas emisiones de cadenas de hidrocarburos, partículas y de CO.
- El tipo de tobera en principio no debería afectar a la medida de tasa, pues el área nominal de ambas es la misma. Sin embargo se ha comprobado en el microscopio que realmente las áreas efectivas de ambas toberas son menores que las nominales, especialmente en el caso de la tobera A. Debido a esto, la tobera A inyecta menor masa por ciclo que la tobera B ante igualdad de condiciones.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES GENERALES

6.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las conclusiones generales obtenidas tras la realización del trabajo. Además de los resultados propiamente dichos ya descritos en el capítulo anterior también se hará hincapié en los conocimientos y logros alcanzados.

6.2. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este proyecto ha sido profundizar en el estudio de los motores dual fuel, tecnología en desarrollo y muy interesante como alternativa a los motores de combustión interna alternativa tradicionales. Los motores dual fuel permiten, por un lado, reducir en gran medida las emisiones de contaminantes a la atmósfera contribuyendo así a un desarrollo sostenible, y, por otro lado, consiguen fiabilidad en el suministro para embarcaciones y se constituyen como solución ante un posible agotamiento de las reservas petrolíferas.

Durante la realización del trabajo se ha trabajado con software especializado, como Matlab o Solidworks. Así, además de conocer y estudiar los motores diesel y de gas natural, se ha practicado en el uso de herramientas informáticas de gran utilidad en el mundo laboral.

El trabajo fin de grado expuesto se engloba dentro un proyecto europeo financiado de forma pública y en el que participan diferentes universidades y empresas. Además, ha existido la posibilidad de realizarlo en el seno del CMT Motores Térmicos, departamento de gran prestigio a nivel nacional e internacional. La colaboración en un proyecto de estas características ha permitido la introducción en el mundo de la investigación adquiriendo una valiosa experiencia personal en el trabajo en equipo, en la toma de decisiones y en la formación práctica.

Como ya se ha nombrado, como objetivo académico, se ha realizado el Trabajo Fin de Grado necesario para obtener el título de Ingeniero de la Energía por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia.

Paralelamente a la experiencia y logros adquiridos se ha caracterizado un inyector diesel solenoide, midiendo la tasa inyectada con los programas propios de la instalación y estudiando el efecto de los principales parámetros que afectan al funcionamiento de los motores, como son la presión de inyección, la contrapresión en el cilindro, el tiempo de energización y el tipo de tobera utilizada. Esta información será utilizada posteriormente por el grupo de CFD para configurar y validar las simulaciones del proyecto.

Además del ensayo de medida de tasa acordado como colaboración en el proyecto, se ha medido el diámetro real de las dos toberas y se ha estudiado en qué medida el uso del inyector en el motor puede afectar al coeficiente de descarga de la tobera.

El tiempo de energetización es, sin duda, el parámetro que más influye en cuanto a la medida de tasa. Como se ha explicado anteriormente su efecto es directo, cuanto más tiempo se inyecte diesel mayor cantidad se inyectará. Al mismo tiempo es una variable fundamental para el control de las emisiones de contaminantes. Tiempos de energetización excesivamente cortos o largos producirán combustiones incompletas, con sus respectivas emisiones de cadenas de hidrocarburos, partículas y de CO.

El tipo de tobera en principio no debería afectar a la medida de tasa, pues el área nominal de ambas es la misma. Sin embargo se ha comprobado en el microscopio que realmente las áreas efectivas de ambas toberas son menores que las nominales, especialmente en el caso de la tobera A. Debido a esto, la tobera A inyecta menor masa por ciclo que la tobera B ante igualdad de condiciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Motor Dual Fuel – Desarrollado en la Manera Correcta (MAN B&W)
- [2] <http://cumminsengines.com/dual-fuel>
- [3] <https://www.youtube.com/watch?v=Slo27gMxdPQ>
- [4] Ibáñez Camallonga, J.: Estudio de la influencia de las bajas temperaturas en el funcionamiento de tres familias de inyectores mediante técnicas de medición de tasa y cantidad de, Proyecto Fin de Carrera, E.T.S. Ingeniería del Diseño. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2010.
- [5] Payri, F y Desantes, J.M.: Motores de combustión interna alternativos. Universidad Politécnica de Valencia, Editorial Reverté, S.A., 2011.
- [6] Pampliega Pérez, Carlos: Caracterización hidráulica de un inyector piezoeléctrico de actuación directa para motores diesel de automoción, PFC. Universidad Politécnica de Valencia, 2013
- [7] <http://www.iav.com/en/engineering/products/iav-injection-analyzer>
- [8] Forma de la señal de pulso suministrada por la empresa del prototipo de inyector ensayado
- [9] Bracho León, G.: Experimental and theoretical study of the direct diesel injection process at low temperatures, Ph.D. Thesis. Departamento de Máquinas y Motores térmicos. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2011.
- [10] Gimeno, J.: Estudio de la inyección diesel mediante la medida del flujo de cantidad de movimiento del chorro. Universidad Politécnica de Valencia, Editorial Reverté, S.A., 2011.

II. PRESUPUESTO

CAPÍTULO 1. PRESUPUESTO

1.1. INTRODUCCIÓN

En el presente documento se expone el coste de realización total de este proyecto, que se va a desglosar en 4 apartados: coste de mano de obra, coste de equipos empleados, coste de materiales y coste de materiales fungibles. Al final del capítulo se presenta la metodología seguida para el cálculo del presupuesto.

Cabe destacar que para la realización de dicho proyecto no ha sido necesaria la adquisición de algunos equipos por encontrarse en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Por lo tanto, este coste se ha calculado en función de la amortización aplicable a cada uno de dichos equipos utilizados. Así mismo, no se considera el valor de los elementos que componen los sistemas propios de la sala, como los sistemas de abastecimiento de agua, climatización, seguridad, suministro de combustible, eléctrico, etc. de la misma forma que con los componentes constructivos de la sala, ya que todos ellos estaban disponibles desde que se construyó el edificio donde está situado el laboratorio de inyección.

1.2. CÁLCULO DE COSTES

En este apartado se procede al cálculo del coste total de las dos instalaciones en conjunto, ya que el montaje de toda la instalación es prácticamente igual para las dos instalaciones. Para ello, se calculará por partes separadas, el coste de la mano de obra empleada referente a los dos ingenieros industriales que trabajan, el coste de los equipos empleados que ya se encontraban en el CMT y que se calculan en función de la amortización, el coste del material que es necesario comprar para este proyecto y el coste del material fungible que se consume para este proyecto. Por último, se calcula el presupuesto final como suma de todos los costes por separado. A continuación se procede al cálculo de cada uno.

1.2.1. COSTE DE LA MANO DE OBRA

Para el cálculo del coste de la mano de obra se calculan las horas de trabajo necesarias para montar las instalaciones y posteriormente las horas necesarias para la toma de medidas. El número de días laborales que se han necesitado para este proyecto han sido 25, de los cuales 13 se han dedicado al montaje de las instalaciones y 12 para toma de medidas. Suponiendo que los 2 ingenieros trabajan los 25 días durante jornadas de 8 horas diarias, en la tabla 1.1. se muestra el coste asociado a ellos.

Coste de la mano de obra empleada					
Ref	Descripción	Ud	Cantida	Precio	Importe[
2.1	Ingeniero Industrial	h	200	22,33	4.466
2.1	Ingeniero Industrial	h	200	22,33	4.466
Total					8.932

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

1.2.2. COSTE DE LOS EQUIPOS

Como ya se ha dicho en la introducción del capítulo, puesto que la mayoría de los equipos ya se encontraban en el departamento, para el cálculo de su coste asociado se tomará la amortización en función del número de horas de uso para los ensayos. La cantidad de horas que están en funcionamiento los equipos de la tabla 1.2. se aproxima a 96 horas asumiendo que se encuentran en operación la jornada completa de los 12 días de medida en función de la instalación.

Dentro de la tabla 1.2. hay una serie de conceptos que engloban varios elementos, como son:

- Carro de instalación: compuesto por filtro, bomba, motor, poleas y correa, líneas de alta presión flexibles y de baja presión, depósito, intercambiador, cuadro eléctrico, perfiles, ruedas y tornillería.
- Equipo Tasímetro: formado por tasímetro, rack del tasímetro y acondicionador de señal de tasa.
- Equipo de termorregulación: formado por depósito de glicol, nevera y termorregulador.

Coste de los equipos empleados					
Ref	Descripción	U	Cantid	Precio	Import
2.3	Carro de la instalación	h	96	0,90	86,4
2.4	Cadena de Medida Yoko	h	96	1,04	99,84
2.5	PID y rack de temperaturas	h	96	0,74	71,04
2.6	Equipo tasímetro	h	96	0,29	27,84
2.7	Sensor de presión	h	96	0,30	28,8
2.8	Equipo de	h	96	0,49	47,04
2.9	Generador de frecuencia	h	96	0,07	6,72
2.1	Balanza	h	96	0,68	65,28
2.1	Bomba de aspiración	h	96	0,06	5,76
2.1	Manorreductor	h	96	0,35	33,6
2.1	Filtro separador	h	96	0,20	19,2
2.1	Ordenador	h	96	0,17	16,32
2.1	Impresora	h	4	0,04	0,16
Total					508

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

Hay que destacar que hay 3 aparatos costosos cuya amortización no se tiene en cuenta en este presupuesto debido a que son suministrados por la empresa. Estos aparatos son el Genotec, el raíl y el inyector, así como las líneas rígidas de alta presión y el cableado entre el Genotec e inyector.

1.2.3. COSTE DEL MATERIAL

En este apartado se detalla el coste de los materiales que se han comprado para este proyecto. En ellos se incluye el precio completo.

Coste del material empleado					
Ref	Descripción	U	Cantid	Precio	Import
2.1	Regleta de enchufes	u	4	3,70	14,80
2.1	Probeta de ensayo	u	1	11,40	11,40
2.1	Abrazaderas metálicas	u	100	0,18	18,00
2.2	Abrazaderas de plástico	u	100	0,09	9,00
2.2	Arandelas de cobre	u	100	0,60	60,00
2.2	Cable coaxial RG58	m	50	0,40	20,00
2.2	Clavija cable coaxial	u	12	1,26	15,12
2.2	Tornillería	u			50,00
2.2	Material Oficina	u			6,31
Total					204,63

Tabla 1. 3. Cálculo del coste del material

1.2.4. COSTE DEL MATERIAL FUNGIBLE

A continuación se muestra en la tabla 1.4. los costes de los recursos que se consumen en este proyecto, que incluyen el gasoil, nitrógeno y electricidad.

Coste del material fungible					
Re	Descripción	U	Cantid	Precio	Import
2.2	Gasoil Shell V-Oil	l	50	1,25	62,50
2.2	Nitrógeno	U	1	58,00	58,00
2.2	Electricidad	k	1051,2	0,15	157,68
Total					278,18

Tabla 1. 4. Cálculo del coste del material fungible

Para el cálculo de la electricidad consumida, se va a valorar la electricidad consumida por la instalación durante 12 días de ensayos y la consumida por la iluminación de la sala durante 25 días. Para añadir la electricidad consumida por los aparatos adjuntos a la instalación se asumirá que su consumo es del 50% de la potencia del motor. Se toma una potencia media consumida por el motor que en este caso es de 6300W:

- Instalación: motor 6,3 Kw * 12 días * 8 horas/día = 604,8 kWh
- Aparatos adjuntos: 604,8 kWh * 0,5 = 302,4 kWh
- Iluminación: 18 tubos * 0,04 Kw/tubo * 25 días * 8 horas/día = 144 kWh
- Total Potencia consumida: 604,8 + 302,4 + 144 = 1051,2 kWh

1.2.5. COSTE TOTAL

Por último se detalla el coste total del proyecto en la tabla 1.5. en el que se añaden unos porcentajes en concepto de Gastos Generales, Beneficio Industrial y por último el IVA.

Descripción	Importe
Coste de la mano de obra	8.932 €
Coste de los equipos	508 €
Coste del material	204,63 €
Coste del material fungible	278,18 €
Presupuesto de ejecución material	9.922,81 €
Gastos Generales (13%)	1.289,96 €
Beneficio Industrial (6%)	595,37 €
Presupuesto de ejecución por contrata	11.808,13 €
IVA (21%)	2.479,71 €
Presupuesto total	14.287,84 €

Tabla 1. 5. Cálculo del coste total

Por lo tanto, el coste total del presente proyecto asciende a la cantidad de CATORCE MIL DOSCIENTOS OCHENTA Y SIETE EUROS, CON OCHENTA Y CUATRO CÉNTIMOS.

1.3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

1.3.1. CÁLCULO DEL COSTE DE LA MANO DE OBRA

Los datos utilizados para el cálculo han sido obtenidos del manual de procedimiento para la contratación de personal del Instituto de Investigación CMT, aportado por el jefe de personal gerente de dicho instituto. Para el cálculo del coste horario de un Ingeniero Industrial se procede de la siguiente manera:

- Horas trabajadas al año: $[365 \text{ días/año} - [2 \cdot (52-4) + 15] \text{ días festivos/año} - 30 \text{ vacaciones/año}] \cdot 8 \text{ horas/día} = 1792 \text{ horas/año}$
- Salario anual: 30094,4 €/año
- Seguridad social: 33%: 9931,15€
- Salario bruto medio anual: 40025,55€/año
- Coste horario: 22,33 €/hora

1.3.2. CÁLCULO DEL COSTE DE LOS EQUIPOS

Para calcular el coste por la utilización de los equipos se ha tenido en cuenta la amortización y el mantenimiento de cada uno de ellos. Así, el precio unitario o tasa horaria se calcula de la siguiente forma:

Pliego de condiciones 1. Condiciones generales del laboratorio de inyección

- Amortización constante: Este método corresponde con la hipótesis de depreciación lineal a lo largo de la vida del producto o período de amortización elegido. Su valor se calcula con la siguiente fórmula:

$$a = \frac{V_c - V_r}{n} \quad (1.1)$$

siendo:

a : amortización [€/año]

V_c : valor de compra [€]

V_r : valor residual al cabo del periodo de amortización [€]

n : período de amortización [años]

- Tasa horaria:

$$T_h = \frac{a+m}{h} \quad (1.2)$$

siendo:

T_h : tasa horaria [€/hora]

h : horas anuales trabajadas [horas/año] = 1792

m : mantenimiento [€/año]

Descripción	V _c	V _r	n	a	m	T _h
Carro de instalación	930	210	5	144	1	0,90
Cadena de Medida Yokohama	120	102	1	180	6	1,04
PID y rack de	180	500	1	130	2	0,74
Equipo Tasímetro	162	137	5	489,	3	0,29
Sensor de presión	301	250	1	517	2	0,30
Equipo de	321	800	3	806	7	0,49
Generador de	523	400	1	123	0	0,07
Balanza	180	600	1	120	5	0,68
Bomba de aspiración	108	0	1	108	0	0,06
Manorreductor	623	0	1	623	5	0,35
Filtro separador	350	0	1	350	0	0,20
Ordenador	180	120	2	300,	1	0,17
Impresora	180	120	2	30	3	0,04

Tabla 1. 6. Cálculo de la tasa horaria y amortización.