



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA


ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial
y Diseño Industrial

Estudio experimental del proceso de inyección de
amoníaco a alta presión para sistemas propulsivos
sostenibles

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: López López, José Martín

Tutor/a: Bracho León, Gabriela Cristina

Cotutor/a: Morena Borja, Joaquín de la

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL



TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio experimental del proceso de
inyección de amoníaco a alta presión
para sistemas propulsivos sostenibles

AUTOR: JOSÉ MARTÍN LÓPEZ LÓPEZ
TUTORA: DRA. GABRIELA BRACHO LEÓN

Agradecimientos

A mis padres, hermano y abuela por su constante apoyo, amor y sabiduría a lo largo de mi vida y durante la realización de este grado. Su ejemplo de dedicación y esfuerzo ha sido una constante fuente de inspiración para mí, vuestro esfuerzo no ha sido en vano. Gracias por estar siempre a mi lado y por creer en mí en todo momento. Este logro es tan vuestro como mío.

Al resto de mi familia, su incondicional confianza en mí ha sido una de las principales fuentes a las que agarrarse para seguir hacia adelante.

A mis amigos, por hacer de este camino un trayecto mucho más alegre. Gracias por los momentos de risa, por estar ahí cuando lo necesitaba y por celebrar cada buena noticia conmigo. Este logro también es vuestro.

A Gabriela Bracho y Daniel Pinilla por su paciencia y apoyo durante el proyecto. Vuestro conocimiento, dedicación y compañía han sido el pilar de mi proyecto. Gracias por creer en mi y por ayudarme a alcanzar la meta. Este trabajo no habría sido posible sin vuestra orientación y talento.

A José Enrique del Rey y Omar Huertas, gracias por vuestra atención y amabilidad durante todas las horas de proyecto, habéis conseguido crear una atmósfera preciosa de trabajo bajo la cual fue mucho más fácil pasar las horas.

Resumen

El amoníaco tiene un gran potencial en la descarbonización del transporte, especialmente en sectores donde la electrificación a corto plazo no es posible (transporte pesado, marítimo o aéreo). La industria y la comunidad científica están colaborando en trabajos de investigación para el desarrollo de sistemas de propulsión sostenibles alimentados con amoníaco.

El presente Trabajo Fin de Grado forma parte de las actividades (paquetes de trabajo) del proyecto *TED – Digiammonia*, financiado por la Agencia Estatal de Investigación. El objetivo es caracterizar el proceso de inyección con este tipo de combustible.

Las propiedades físicas y químicas del amoníaco son diferentes a las de un combustible fósil convencional, afectando al proceso de inyección (atomización y mezcla).

Para la realización del trabajo se dispone de una instalación experimental para caracterizar la inyección a través de la medida del flujo de la cantidad de movimiento. Dicha instalación fue diseñada para trabajar con combustibles convencionales y en este proyecto se han realizado los cambios pertinentes para poder utilizar el amoníaco. El sistema se ha caracterizado para diferentes condiciones de operación: varios niveles de presión de inyección, contrapresión y diámetros de toberas.

Los resultados obtenidos se han comparado con el combustible de referencia, y se ha observado que el sistema de inyección es estable para un rango de presiones desde 450 a 800 [bar] y operando a bajas temperaturas (16 °C). Se ha demostrado con datos experimentales que la rampa de apertura de la inyección es más lenta cuando se usa amoníaco, y la duración es más corta. Estos resultados son los primeros reportados en la literatura y servirán como información relevante para el análisis de la evolución de los chorros y como condiciones de contorno para futuros modelos computacionales 3D.

Finalmente, a lo largo de este proyecto se ha estudiado la viabilidad y las ventajas del uso de amoníaco como combustible en sistemas de propulsión sostenible, en el contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, en particular el ODS 7 (Energía Asequible y No Contaminante) y el ODS 13 (Acción por el Clima).

Abstract

Ammonia has great potential in decarbonizing transportation, especially in sectors where electrification is not feasible in the short term, such as heavy transport, maritime, and aviation. The industry and the scientific community are collaborating on research to develop sustainable propulsion systems powered by ammonia. This thesis is part of the activities (work packages) of the TED – Digiammonia project, funded by the Spanish State Research Agency. The objective is to characterize the injection process with this type of fuel.

The physical and chemical properties of ammonia are different from those of conventional fossil fuels, affecting the injection process (atomization and mixing).

For the realization of this thesis, an experimental setup is available to characterize the injection through the measurement of the momentum flow. This setup was designed to work with conventional fuels, and the necessary modifications have been made in this project to use ammonia. The system has been characterized under different operating conditions: various injection pressure levels, backpressure, and nozzle diameters.

The results obtained have been compared with the reference fuel, and it has been observed that the injection system is stable within a pressure range from 450 to 800 [bar] and operating at low temperatures (16°C). Experimental data have shown that the injection opening ramp is slower when using ammonia, and the duration is shorter. These results are the first reported in the literature and will serve as relevant information for analyzing jet evolution and as boundary conditions for future 3D computational models.

Finally, throughout this project, the feasibility and advantages of using ammonia as a fuel in sustainable propulsion systems have been studied, in the context of the Sustainable Development Goals (SDGs) of the United Nations 2030 Agenda, particularly SDG 7 (Affordable and Clean Energy) and SDG 13 (Climate Action).

Resum

L'amoníac té un gran potencial en la descarbonització del transport, especialment en sectors on l'electrificació a curt termini no és possible (transport pesat, marítim o aeri). La indústria i la comunitat científica estan col·laborant en treballs de recerca per al desenvolupament de sistemes de propulsió sostenibles alimentats amb amoníac.

El present Treball Fi de Grau forma part de les activitats (paquets de treball) del projecte *TED – Digiammonia*, finançat per l'Agència Estatal d'Investigació. L'objectiu és caracteritzar el procés d'injecció amb esta tipus de combustible.

Les propietats físiques i químiques de l'amoníac són diferents a les d'un combustible fòssil convencional, afectant el procés d'injecció (atomització i mescla).

Per a la realització del treball es disposa d'una instal·lació experimental per a caracteritzar la injecció a través de la mesura del flux de la quantitat de moviment. Esta instal·lació va ser dissenyada per a treballar amb combustibles convencionals i en este projecte s'han fet els canvis pertinents per a poder utilitzar l'amoníac. El sistema s'ha caracteritzat per a diferents condicions d'operació: diversos nivells de pressió d'injecció, contrapressió i diàmetres de toveres.

Els resultats obtinguts s'han comparat amb el combustible de referència, i s'ha observat que el sistema d'injecció és estable per a un rang de pressions des de 450 a 800 [bar] i operant a baixes temperatures (16 °C). S'ha demostrat amb dades experimentals que la rampa d'obertura de la injecció és més lenta quan s'usa amoníac, i la duració és més curta. Estos resultats són els primers reportats en la literatura i serviran com a informació rellevant per a l'anàlisi de l'evolució dels dolls i com a condicions de contorn per a futurs models computacionals 3D.

Finalment, al llarg d'este projecte s'ha estudiat la viabilitat i els avantatges de l'ús d'amoníac com a combustible en sistemes de propulsió sostenible, en el context dels Objectius de Desenvolupament Sostenible (ODS) de l'Agenda 2030 de les Nacions Unides, en particular el ODS 7 (Energia Assequible i No Contaminant) i el ODS 13 (Acció pel Clima).

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	V
Abstract	VII
Resum	IX
Nomenclatura	XV
Índice de figuras	XX
Índice de tablas	1
I Memoria	3
1. Planteamiento del proyecto	5
1.1. Introducción	5
1.2. Precursores	6
1.3. Objetivos y justificación	7
1.4. Motivación y viabilidad. Amoníaco en el sector aeroespacial	9
1.5. Objetivos de desarrollo sostenible (ODS). Agenda 2030.	12
1.6. Descripción del proyecto	13
2. Marco teórico	15
2.1. Introducción	15
2.2. Sistema de inyección	15
2.2.1. Tipos de inyección	16

2.2.2. Partes del sistema	21
2.3. Requerimientos que tiene que cumplir un sistema de inyección	28
2.4. Descripción del combustible	28
2.4.1. Propiedades físicas del amoníaco	29
2.4.2. Propiedades químicas del amoníaco	30
2.4.3. Comparación entre diésel y amoníaco	31
2.5. Descripción proceso de inyección	32
2.5.1. Determinación de la tasa de inyección y masa inyectada	32
2.5.2. Determinación de la medida de cantidad de movimiento	33
2.6. Necesidad de caracterizar los sistemas de inyección para el NH_3	34
3. Metodología	39
3.1. Dispositivos y herramientas	39
3.1.1. Maqueta de medida de tasa de inyección	39
3.1.2. Maqueta de cantidad de movimiento	43
3.1.3. Motor eléctrico	45
3.1.4. Bomba	46
3.1.5. Raíl	47
3.1.6. Inyectores	48
3.1.7. Filtro y depósito de combustible	49
3.1.8. Balanza	51
3.1.9. Depósito amoníaco	51
3.1.10. Botella de nitrógeno	52
3.1.11. Manorreductor	53
3.1.12. Sistema de refrigeración global CMT	54
3.1.13. Circuitos combustible diésel-amoníaco	54
3.1.14. Amplificador de la señal de presión en la maqueta de cantidad de movimiento	55

3.2. Metodología de adquisición de datos y postprocesado	56
3.2.1. Inyector Control Unit (ICU)	56
3.2.2. Regler	57
3.2.3. Genotec y Magnetoinyector	57
3.2.4. Xbalancin	58
3.2.5. Hojas de cálculo	59
3.2.6. Osciloscopio Yokogawa y software YOKO	60
3.2.7. Xtasutiles	61
4. Análisis experimental y de resultados	63
4.1. Plan de ensayos del proyecto	63
4.2. Caracterización del sistema con el combustible de referencia (diésel)	65
4.2.1. Medidas de tasa (50 reps)	65
4.2.2. Medidas de cantidad de movimiento	74
4.3. Caracterización con NH_3	76
4.3.1. Medidas de cantidad de movimiento	76
4.3.2. Análisis de tasa	79
4.4. Medidas con diésel presurizado en el retorno	81
4.5. Análisis de la influencia del amoníaco	83
4.6. Comparación entre combustibles. Análisis de resultados	84
5. Conclusiones	87
6. Anexo	89
6.1. Análisis diámetro inyector 250-2	89
Bibliografía	91

II	Pliego de condiciones	93
1.	Introducción	95
2.	Sistema de seguridad del laboratorio de inyección y de medida de cantidad de movimiento	95
2.1.	Dispositivos de seguridad y materiales de los laboratorios	95
2.2.	Consideraciones para los operarios de la instalación	97
3.	Arranque y parada de las instalaciones	97
3.1.	Arranque de las instalaciones para medida de tasa y CdM	97
3.2.	Parada de medida en las instalaciones	98
4.	Mantenimiento de la instalación	99
5.	Seguridad en las medidas de NH_3	100
6.	Protocolo de actuación en caso de accidente	104
III	Presupuesto	105
1.	Introducción	107
2.	Coste de los equipos de la instalación	107
3.	Coste materiales no pertenecientes a la instalación	109
4.	Coste del material fungible	110
5.	Coste de personal	110
6.	Resumen	111

Nomenclatura

Tabla de Símbolos y Nomenclaturas	
NH_3	Amoníaco
GHG	Emisiones de gases de efecto invernadero
CO_2	Dióxido de carbono
NO_x	Óxidos de nitrógeno
N_2	Nitrógeno
LCA	Análisis de ciclo de vida
UCR	Universidad de California
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ECU	Unidad de control electrónico
PMI	Punto muerto inferior
PMS	Punto muerto superior
SCR	Catalizador de reducción selectiva
A_t	Área del tubo del inyector
c	Velocidad del sonido
ROI	Tasa de inyección
CdM	Cantidad de movimiento
ICU	Unidad de control del inyector
EPI	Equipo de protección individual
HC	Hidrocarburos
a	Amortización
T_h	Tasa horaria
m	Mantenimiento
V_c	Valor de compra
V_r	Valor residual
n	Años necesarios para la amortización

Índice de figuras

1.1. Proceso de Haber-Bosch [1]	6
1.2. Esquema del funcionamiento de los motores del avión Dassault Falcon 50 [2]	9
1.3. Motor Raptor bajo pruebas por Space X [3]	10
1.4. North American X-15 [4]	12
2.1. Esquema Inyección Indirecta [8]	16
2.2. Esquema Inyección Directa [8]	18
2.3. Diferentes formas de la cámara de combustión [5]	19
2.4. Diagrama del sistema de inyección common rail [9]	20
2.5. Diagrama del sistema de inyección common rail, 2. [12]	21
2.6. Sección de una bomba de alta presión de tres émbolos [12]	22
2.7. Esquema de una bomba de inyección de alta presión[12]	22
2.8. Raíl [10]	23
2.9. Sensor de presión [6]	24
2.10. Regulador de presión [7]	24
2.11. Inyector de un sistema common rail de tipo solenoide [18]	25
2.12. Válvula de accionamiento tipo solenoide de un inyector common-rail [18] .	26
2.13. Funcionamiento del inyector piezoeléctrico [11]	27
2.14. Inyector piezoeléctrico activado y desactivado [11]	27
2.15. Principio de medida del flujo de cantidad de movimiento [18]	33

2.16. Representación del flujo a la salida de una tobera en una situación real (a) y equivalente (b) [18]	34
2.17. Evolución del chorro de los combustibles diésel y amoníaco en estado líquido y gaseoso [14]	35
2.18. Configuración de entradas para el modelo 1D [14]	36
2.19. Curvas de rocío y de burbuja para amoníaco a diferentes presiones ambiente [14]	36
2.20. Validación del modelo 1D para el chorro líquido y gaseoso de los combustibles diésel (izquierda) y amoníaco (derecha [14])	37
3.1. Tasímetro utilizado en instituto CMT	40
3.2. Esquema hidráulico neumático instalación de medida de tasa	41
3.3. Esquema eléctrico instalación de medida de tasa	41
3.4. Representación 2D de la instalación medida de tasa instituto CMT	42
3.5. Instalación medida de tasa instituto CMT	43
3.6. Instalación medida de cantidad de movimiento instituto CMT	44
3.7. Representación 2D maqueta de cantidad de movimiento	44
3.8. Esquema hidráulico neumático instalación de medida de CdM	45
3.9. Esquema eléctrico instalación de medida de tasa	45
3.10. Motor eléctrico	46
3.11. Bomba de alta presión de la instalación de tasa	47
3.12. Raíl	47
3.13. Portainyector	48
3.14. Inyector 250-2	49
3.15. Depósito de diésel	50
3.16. Filtro de combustible	50
3.17. Balanza	51
3.18. Depósito NH_3	52
3.19. Depósito N_2	53

3.20. Manorreductor aire comprimido maqueta CdM	54
3.21. Enfriadora instituto CMT	54
3.22. Circuitos de separación de combustible CdM	55
3.23. Esquema circuitos de separación de combustible CdM	55
3.24. Amplificador de señal de cantidad de movimiento	56
3.25. Unidad de control del inyector	56
3.26. Regler	57
3.27. Genotec	58
3.28. Software <i>Magnetoinyector</i>	58
3.29. Software <i>xbalancin</i>	59
3.30. Muestra software <i>Excel</i> en los ensayos de tasa	60
3.31. Muestra software <i>Excel</i> en los ensayos de CdM	60
3.32. Software y osciloscopio YOKO	61
3.33. Software <i>xtasutiles</i>	61
3.34. Ejemplo resultados software <i>xtasutiles</i>	62
4.1. Plan de ensayos tasa	64
4.2. Plan de ensayos cantidad de movimiento	65
4.3. 50 repeticiones medida de tasa	66
4.4. Señal de tasa negativa (a) y señal de tasa positiva (b)	67
4.5. Polinomio de corrección medida de tasa	67
4.6. Señal corregida medida de tasa	68
4.7. Señal final de tasa corregida	68
4.8. Señal final de tasa	69
4.9. Señal de tasa para diferentes presiones de inyección	69
4.10. Señal de tasa para diferentes contrapresiones	70
4.11. Señal de tasa para diferentes tiempos de energización	71

4.12. Señal de tasa para diferentes diámetros de tobera	72
4.13. Intervalos de medida del caudal medio \dot{m}_f	74
4.14. Análisis del coeficiente de descarga	74
4.15. Ejemplo de las medidas de CdM	75
4.16. Influencia de la presión de inyección en las medidas de CdM	75
4.17. Influencia del diámetro de la tobera en las medidas de CdM	76
4.18. Ensayo de medida de CdM con NH_3	77
4.19. Influencia de la presión de inyección con amoníaco en CdM	78
4.20. Influencia del diámetro de la tobera con amoníaco en CdM	79
4.21. Esquema obtención de la señal de tasa	80
4.22. División en segmentos de las curvas	80
4.23. Señal de tasa en amoníaco	81
4.24. Señal de CdM en diésel con el flujo de retorno presurizado	82
4.25. Evolución del chorro de los combustibles diésel y amoníaco en estado líquido y gaseoso [14]	83
4.26. Diferencias en el retraso y cierre del proceso de inyección	83
4.27. Comparación de flujo de CdM entre diésel y amoníaco	84
4.28. Comparación de flujo de CdM entre diésel presurizado en el retorno y amoníaco	85
4.29. Comparación de las señales de tasa de amoníaco y diésel	86
6.1. Ampliación de las secciones de medida de la tobera	89
6.2. Ejemplo de medida del diámetro de una circunferencia	90
6.3. Máscara de protección obligatoria	101
6.4. Ampliación de planos de la sala de medida de cantidad de movimiento . . .	101
6.5. Representación 2D recirculación de NH_3 de la instalación de CdM	103

Índice de tablas

1.5.1.Objetivos de Desarrollo Sostenible	13
2.4.1.Comparación entre Diésel y Amoníaco	31
2.4.2.Comparación entre Diésel y Amoníaco cuantitativa	31
2.5.1.Coefficientes polinomio de la correlación de la velocidad del sonido	32
4.1. Tipo de mantenimiento y acción correspondiente a cada componente o pieza	100
2.1. Coste de los equipos	108
2.2. Cálculo de amortización y tasa horaria	109
3.1. Coste del material no perteneciente a la instalación	109
4.1. Coste del material no perteneciente a la instalación	110
5.1. Coste del material no perteneciente a la instalación	111
6.1. Resumen final del presupuesto	111

Parte I

Memoria

Capítulo 1

Planteamiento del proyecto

1.1. Introducción

Es un hecho bastante conocido que la mayoría de sistemas de propulsión actuales están basados en la combustión de combustibles fósiles, sabiendo que estos y su gran utilización en diversos sectores están causando problemas para la salud y medioambientales. Todo ello, unido al hecho de ser combustibles no renovables ha provocado la investigación de nuevos combustibles que sean capaces de proporcionar prestaciones similares reduciendo las emisiones y por ende, la contaminación.

El hidrógeno es uno de los principales candidatos a tratar, sin embargo, debido a su baja densidad gravimétrica hace replantearse si de verdad conviene en los casos en los que la masa esté limitada como puede ser el caso de la industria aeroespacial. Además, otro de sus inconvenientes es su escasa seguridad debido a la volatilidad del H_2 y su bajo punto de ignición, por lo que se descarta como futuro combustible del sector aeroespacial.

Por último, el amoníaco (NH_3) es otra de las alternativas a considerar gracias a las ventajas de emisión de carbono cero y la amplia experiencia en su síntesis a gran escala. A todo esto hay que añadir la facilidad de licuaje que presenta el amoníaco. También, se ha de tener en cuenta que las dificultades que presentaba su almacenaje hace varias décadas ahora se presentan con unas soluciones técnicas viables que siguen siendo objeto de estudio. De la misma manera que el hidrógeno, el amoníaco puede ser considerado como un vector energético sostenible, pudiendo realizar la combustión del mismo emitiendo solo agua (H_2O) y nitrógeno (N_2). Además, cabe destacar también que existe la posibilidad de distribución de amoníaco a gran escala y pudiéndose almacenar de forma similar que el propano (8 [bar] de presión y condiciones estándar de temperatura). Otra de sus ventajas es que su densidad energética es comparable a la de la gasolina, aunque sigue siendo menor. Esto supone que este combustible sea motivo de estudio para un transporte aéreo futuro seguro y sostenible. En cuanto a la seguridad, su inflamabilidad es muy reducida, siendo menor el riesgo de combustión mientras se transporta, y, si se libera a la atmósfera, debido a su baja densidad se disiparía rápidamente, además, su característico olor permite detectar fugas inmediatamente.

Aunque el NH_3 es muy conocido, no se cuenta con la experiencia suficiente para su implementación directa en los sistemas de propulsión. Es por ello que este proyecto supone el inicio de una nueva línea de investigación confiada al instituto de investigación CMT. Este proyecto supondrá las raíces (medidas de tasa y cantidad de movimiento del amoníaco) para después soportar el resto del estudio (combustión y estudio de prestaciones) del proyecto *TED-Digiammonia*.

1.2. Precursores

En este apartado se tratará el desarrollo histórico del amoníaco, para estudiar el mismo, habrá que desplazarse al siglo XIX.

Durante el siglo XIX, se realizaron los primeros estudios y experimentos sobre la combustión del amoníaco, debido a que, aunque el amoníaco se conocía desde hace mucho tiempo, su uso como combustible era, y todavía sigue siendo, limitado debido a su insegura manipulación, la dificultad de su almacenaje y su peligro medioambiental.

A lo largo del siglo XX se realizaron investigaciones sobre la combustión de este combustible con el fin de comprender mejor los aspectos fundamentales de su combustión, como podrían ser los mecanismos de ignición, la cinética de reacción y las emisiones provocadas. Dichas investigaciones sentaron las bases del futuro desarrollo de la combustión del amoníaco.

En la figura [1.1] se muestra el proceso de Haber-Bosch, este comenzó a utilizarse en 1916 para sintetizar amoníaco. Dicho proceso realiza la síntesis de amoníaco mediante la reacción de nitrógeno e hidrógeno a alta temperatura y presión, ya que se necesita la alta temperatura para evitar la contaminación con el ambiente y la alta presión para poder alcanzar dichas temperaturas. En el año 1916, se utilizó el proceso de Haber-Bosch, que se puede observar en la figura [1.1], con el fin de comenzar a sintetizar amoníaco. Dicho proceso consiste en la reacción de nitrógeno e hidrógeno a alta temperatura y presión, ya que la alta temperatura es necesaria para evitar la contaminación con el ambiente, y la alta presión es necesaria para llegar a dichas temperaturas.

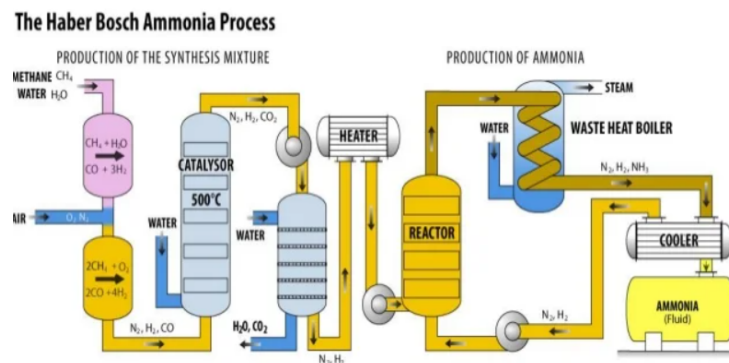


Figura 1.1. Proceso de Haber-Bosch [1]

Durante la Segunda Guerra Mundial, en la década de los 40, en Bélgica, se produjo el

primer transporte que utilizaba amoníaco como combustible, un autobús público utilizó este ventajoso combustible mezclado con carbón.

Adentrándose en la década de los 60, se realizó la investigación del funcionamiento de una turbina con NH_3 como combustible por parte del ejército estadounidense, esta investigación fue abandonada porque no se conseguía una gran eficiencia térmica en el proceso de combustión.

En la primera década del siglo XXI, se fundó la “*NH₃FuelAssociation*” en América, cuya misión principal es promover el amoníaco como combustible asequible, sostenible y libre de emisiones de carbono para utilizar en transporte, almacenamiento de energía, producción de energía, etc. Reduciendo de este modo las emisiones medioambientales producidas por los combustibles con base en carbono.

Con el paso del tiempo, se han ido desarrollando tecnologías específicas para mejorar la eficiencia y la seguridad de la combustión del amoníaco. Dentro de estas, se podrían mencionar sistemas de inyección avanzados, sistemas de control de emisiones, técnicas de almacenamiento más seguras, etc.

Por último, en cuanto a investigaciones recientes, se debe destacar que a lo largo de las últimas décadas ha habido un renovado interés en la combustión de amoníaco, ya que, como se ha citado anteriormente, es una de las principales alternativas de los combustibles fósiles, debido a su potencial en lo que a emisiones de carbono respecta. Se han llevado y se siguen llevando a cabo investigaciones para abordar los problemas que supone su utilización como combustible.

Como resumen final, se podría decir que la combustión de amoníaco ha sufrido un proceso gradual ascendente, con la perspectiva futura de un futuro más sostenible.

1.3. Objetivos y justificación

Como se ha citado anteriormente, los sistemas de propulsión actuales para vehículos pesados como camiones, barcos y aeronaves se basan en motores de combustión alimentados por combustibles fósiles debido a su alta eficiencia térmica y fiabilidad. Sin embargo, se producen grandes cantidades de sustancias nocivas como NO_x y materiales particulados que son muy peligrosos para la salud y para el medio ambiente.

A nivel más global, los sectores del transporte y la industria contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG), principalmente debido a la emisión de dióxido de carbono (CO_2). Desde el Acuerdo de París en 2016, las organizaciones internacionales están tomando medidas para mitigar el calentamiento global y lograr la neutralidad de carbono en los sectores de energía y transporte. Uno de los principales objetivos que se buscan es el reemplazo de los combustibles fósiles tradicionales por combustibles libres de átomos de carbono con el fin de evitar las emisiones CO_2 .

Como se ha dicho anteriormente, uno de los candidatos favoritos era el hidrógeno, debido a la ausencia de átomos de nitrógeno y carbono, sin embargo, ciertas propiedades

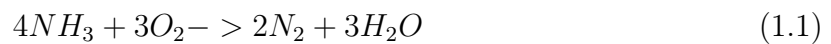
no deseadas del hidrógeno como su baja densidad y alto rango de inflamabilidad son un desafío para la ingeniería debido a su dificultad de almacenaje y transporte seguro.

Por lo que como alternativa se encuentra el amoníaco, ya que la tecnología disponible para su producción y la infraestructura de almacenamiento están más maduras que para el hidrógeno. Además, tiene una densidad energética volumétrica más alta y se puede licuar fácilmente a temperatura ambiente y presiones de alrededor a 8 [bar], en estas condiciones, la energía por unidad de volumen en amoníaco líquido es aproximadamente 1.6 veces más alta que la del hidrógeno líquido.

Además, el amoníaco puede considerarse un combustible muy sostenible si se obtiene utilizando el hidrógeno a partir de fuentes renovables (hidrógeno verde). Sin embargo, a pesar de que la combustión de amoníaco no emita CO_2 , el nitrógeno conduce a una posibilidad de aumento de la emisión de óxidos de nitrógeno.

Todo esto motivó al CMT a estudiar el impacto del amoníaco como combustible, y en un proyecto dirigido por Novella R., se llegó a la conclusión de que con la utilización del amoníaco como combustible, utilizando un modelo virtual y un estudio del LCA de un vehículo, el amoníaco producido completamente a partir de recursos renovables puede reducir el nivel de gases de efecto invernadero hasta un 43 % en comparación con el diésel y la gasolina con las mismas características técnicas. El principal contribuyente de esta reducción es el proceso de obtención del combustible, completamente renovable.

Por lo que finalmente en la combustión se encuentra esta reacción, libre de emisiones NO_x y CO_2



En conclusión, el objetivo del presente TFG es caracterizar el proceso de inyección directa con NH_3 en condiciones análogas de motor en términos de presión de cámara de combustión. Para la realización del trabajo se dispone de una instalación experimental para caracterizar la inyección a través de la medida del flujo de cantidad de movimiento.

El proceso de inyección se analizará para diferentes niveles de presión y varios diámetros de toberas. Los resultados obtenidos se compararán con un combustible de referencia.

Para conseguir este objetivo global, se han planteado varios objetivos parciales:

-Objetivo 1: Caracterización inicial del sistema de inyección utilizando un combustible de referencia (diésel), utilizando la medida de tasa de inyección y de cantidad de movimiento.

-Objetivo 2: Preparación de la herramienta experimental de cantidad de movimiento para utilizar NH_3 .

-Objetivo 3: Caracterización del sistema de inyección con NH_3 y análisis de las diferencias y similitudes respecto al combustible convencional.

1.4. Motivación y viabilidad. Amoníaco en el sector aeroespacial

- **Vuelo con amoníaco por la empresa Aviation H2.**

A pesar de que parezca lejana la combustión de amoníaco en el sector aeroespacial, este pensamiento está muy lejos de la realidad. Como ejemplo, se encuentra la empresa australiana Aviaton H_2 , que se dedica principalmente a buscar las emisiones netas cero en el sector aeroespacial.

Por esto mismo, en 2022, se eligió el amoníaco líquido como combustible para lograr un vuelo de avión sin emisiones, y aseguraron poder modificar los motores turbofán para utilizarlo y comprobarlo.

Este proyecto planeaba tener un avión regional de nueve pasajeros volando con amoníaco verde como combustible. Como ya se ha explicado en el apartado anterior, amoníaco verde es aquel que no ha contaminado durante su proceso de obtención, por lo que para lograr esto, también se ha de trabajar con hidrógeno verde.

La aeronave se correspondía con la conversión de un Falcon 50 a la combustión turbo de amoníaco líquido. Este combustible, además de las prestaciones medioambientales que considera, fue elegido por su alta densidad gravimétrica y volumétrica, lo que lo hace más ligero y fácil de transportar, por lo que se tiene una mayor tasa de conversión de energía. Y en comparación con el hidrógeno, el peso almacenado de la energía del amoníaco líquido es más ligero que el hidrógeno gaseoso, disminuyendo la presión del tanque en el que se conserva.

Finalmente, en el acuerdo con FalconAir en el que Aviation H_2 consiguió acceso a hangares, instalaciones y licencias de explotación, se estableció el nuevo diseño del Dassault Falcon 50, que poseía tres motores, de los cuales, tan solo dos eran necesarios para el vuelo del avión, por lo que los ensayos comenzaron con este motor modificado para utilizar amoníaco líquido en él sin modificar el resto. El esquema de funcionamiento se presenta en la figura [1.2].

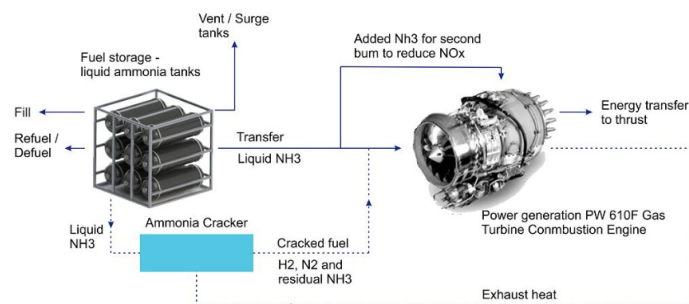


Figura 1.2. Esquema del funcionamiento de los motores del avión Dassault Falcon 50 [2]

En lo que respecta a la autonomía, se buscaba que la aeronave fuese capaz de realizar vuelos regionales de escasa duración con el mismo empuje que las aeronaves anteriores y el mismo rendimiento que con el combustible fósil.

- **Borano de amoníaco como nuevo combustible para los cohetes.**

En segundo lugar, investigadores de la Universidad de California, crearon un combustible que mezclaba el boro y el amoníaco con el fin de terminar con las emisiones de CO_2 , además, este combustible forjado en las supernovas produce más energía y cuesta menos que los que se usan actualmente en lanzamientos espaciales. Por lo que estas ventajas permitirían aumentar el número de lanzamientos y aumentar la carga, por ejemplo, a otro planeta como puede ser Marte o incrementar el número de lanzamientos de satélites y de misiones a la Luna.

A pesar de las prestaciones mecánicas, se ha de pensar también en las medioambientales. De esta manera, cada lanzamiento actual puede llegar a producir hasta 300000 [kg] de CO_2 , y debido al continuo crecimiento de lanzamientos se han de comenzar a tener en cuenta.

Compañías como SpaceX ya han comenzado a buscar alternativas de combustión con el fin de reducir estas emisiones, estas alternativas han pasado por la captura del CO_2 emitido, sin embargo, durante la combustión de estos hidrocarburos también se liberan óxidos de nitrógeno.

Por lo que con el borano de amoníaco o NH_3BH_3 , además de generar más energía que los combustibles fósiles, solo emite óxido de boro (B_2O_3) y agua (H_2O), compuestos menos perjudiciales para el medio ambiente.



Figura 1.3. Motor Raptor bajo pruebas por Space X [3]

Sin embargo, el uso de los boranos como combustible no es una novedad, el ejército estadounidense empezó a producirlos en los años 50 con el objetivo de crear un combustible barato y práctico para almacenar el hidrógeno. Dicho proyecto apenas era eficiente, por lo que se vio obligado a mezclarse con hidrocarburos para su quemado, debido a esto, se producía una sustancia pegajosa que atascaba los motores y era difícil de eliminar. Esto también era provocado por el uso de catalizadores, ya que a pesar de que ayudan a la combustión y la liberación de energía, estos cohetes necesitan grandes cantidades de energía en un rango temporal demasiado corto, por lo que el uso del catalizador no es suficiente, una masa muerta se encontrará depositada en el depósito.

Estos problemas los eliminaron los investigadores de la UCR con el uso de un oxidante que altera los mecanismos de descomposición y oxidación del borano y también ayuda a extraer toda la energía, por lo que se provoca una combustión mas completa de los reactivos y también se logra aumentar la energía de toda la reacción con tan solo la química del propio oxidante.

Los combustibles fósiles utilizados actualmente en lanzamientos de cohetes requieren un rango de temperaturas bajo cero para su positiva conservación; esto no ocurre con el combustible tratado ya que es estable a temperatura ambiente, y puede resistir altas temperaturas.

Por lo que, según afirman los investigadores de la Universidad de California, los muy buenos resultados de este combustible en el laboratorio han de reproducirse a gran escala. Todavía se necesita estudiar el comportamiento de las partículas de borano de amonio en entornos diferentes y como realizar el almacenamiento de este combustible mejorando su estabilidad en condiciones de humedad. Además, se recuerda que el borano de amoníaco es sólido a temperatura ambiente, por lo que se necesitan elevadas temperaturas para realizar su combustión, o se necesita mezclar con hidrocarburos, hecho que no tendría sentido, pues lo que se busca es la sustitución de este combustible.

Si se consigue, no solo se logrará un combustible eficiente en un gran rango de aplicaciones, sino que también a un coste menor al actual de los hidrocarburos fósiles.

Como último ejemplo, se hablará de la aeronave X-15 de la fuerza aérea estadounidense, aeronave que fue tripulada en 1967 y que todavía dispone de varios récords.

■ **North American X-15**

El North American X-15 de la fuerza aérea estadounidense fue un avión completamente experimental que logró alcanzar velocidades hipersónicas siendo tripulado, récord que mantiene hoy endía como la aeronave tripulada más veloz de la historia, alcanzando Mach 6.7.

Esto tiene todavía más mérito para el piloto William J. Knight, si se piensa que en la actualidad se realizan miles de pruebas antes de lanzar al espacio una aeronave de este estilo, en la década de los 60, estas pruebas eran limitadas e insuficientes. Por lo que el piloto estadounidense ostenta el récord y la valía de dicha prueba de muerte.

En relación con otros desarrollos experimentales que tuvieron una vida relativamente corta, en el experimento del X-15 se desarrollaron 3 unidades que realizaron 199 vuelos desde 1959 hasta 1968, siendo 12 pilotos los encargados de volarlas, entre ellos, Neil Armstrong.

A día de hoy, todavía sigue pareciendo surrealista, que 64 años después del vuelo de los hermanos Wright se lograra volar a una velocidad semejante, sin embargo, para proyectos como este solo hacían falta dos cosas, dinero suficiente y personas dispuestas a asumir ese riesgo.

La Fuerza Aérea de Estados Unidos y el Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica (NACA) fueron los creadores de dicho proyecto, sin embargo, NACA se disolvió en

1958 pasando a formar parte de lo que hoy en día se conoce como NASA. Pasados unos meses, North American Aviation se encargó del diseño y la fabricación del fuselaje, mientras que a Reaction Motors se le encargó el sistema de propulsión, que es lo que interesa en este proyecto realmente.

Este sistema propulsivo es esencialmente un cohete con superficies de vuelo maniobrables y una cabina. Al principio esta aeronave utilizó un motor cohete XLR11, que también se utilizó para la aeronave Bell X-1, primera aeronave en romper la barrera del sonido. Este cohete solo duró once vuelos hasta ser sustituido por el XLR 99, que proporcionaba 57000 libras de empuje, lo que se corresponde con aproximadamente 210000 [N]. Todo esto fue conseguido usando amoníaco anhidro y oxígeno como combustible. El inconveniente era el consumo, ya que el jet podía llegar a quemar 6800 [kg] de propulsor en poco más de un minuto.

Dicho inconveniente no fue un impedimento para batir los récords que todavía ostenta el X-15.



Figura 1.4. North American X-15 [4]

1.5. Objetivos de desarrollo sostenible (ODS). Agenda 2030.

La Agenda 2030 para el desarrollo sostenible ofrece un conjunto de objetivos compartidos con el fin de asegurar la seguridad y prosperidad de las personas, el planeta y la paz. Esta agenda recoge los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible que conforman los principales campos de mejora para asegurar los objetivos propuestos.

Este proyecto trabaja en mayor o menor medida en unos cuantos de ellos. Las posibles mejoras de este proyecto en estos objetivos se resumen en la siguiente tabla:

Objetivo de Desarrollo Sostenible	Alto	Medio	Bajo	No procede
1. Fin de la pobreza				X
2. Hambre cero				X
3. Salud y bienestar		X		
4. Educación de calidad				X
5. Igualdad de género				X
6. Agua limpia y saneamiento			X	
7. Energía asequible y no contaminante	X			
8. Trabajo decente y crecimiento económico		X		
9. Industria, innovación e infraestructura	X			
10. Reducción de las desigualdades				X
11. Ciudades y comunidades sostenibles	X			
12. Producción y consumo responsables				X
13. Acción por el clima	X			
14. Vida submarina	X			
15. Vida de ecosistemas terrestres	X			
16. Paz, justicia e instituciones sólidas				X
17. Alianzas para lograr los objetivos				X

Tabla 1.5.1: Objetivos de Desarrollo Sostenible

1.6. Descripción del proyecto

En lo que respecta al proyecto se divide en tres partes:

- **Parte 1: Memoria.** A lo largo de esta presente parte, se desarrolla el planteamiento del proyecto que se acaba de leer a modo introductorio, el marco teórico en el que se engloba el proyecto, la metodología experimental empleada para su realización, el análisis experimental y de resultados, las conclusiones del proyecto, un capítulo referente a algún anexo y la bibliografía del proyecto.
- **Parte 2: Pliego de condiciones.** En esta parte, se expondrán los sistemas de seguridad del laboratorio de inyección, la secuencia impuesta para el arranque y parada segura del laboratorio, el mantenimiento que ha de seguir la instalación, las medidas de seguridad necesarias a tener en cuenta para este compuesto tan peligroso como es el NH_3 y el protocolo de actuación en caso de accidente
- **Parte 3: Presupuesto.** En esta última parte se expondrá el presupuesto global del proyecto desglosado en sus componentes principales: coste de los equipos de la instalación, coste de los materiales no pertenecientes a la instalación, coste del material fungible y el coste de personal (mano de obra).

También es destacable que en el proyecto no se expone una parte referente a los planos, esto se debe a la escasa necesidad de planos en este proyecto para su entendimiento y debido a que los planos más importantes han sido facilitados anexos a los apartados correspondientes.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Introducción

A lo largo de este capítulo, los fundamentos teóricos del sistema de inyección de combustible serán expuestos, tanto para el combustible diésel, como para el amoníaco. En un apartado se realizará una caracterización de ambos combustibles con sus respectivas propiedades físicas y químicas. Por último, en el caso del amoníaco, también se introducirá una descripción de su proceso de inyección, al igual que la necesidad de caracterizar dicho combustible.

2.2. Sistema de inyección

Antes de adentrarse en la descripción de cada sistema de inyección, se explicarán una serie de generalidades en lo que respecta a los sistemas de inyección de un motor de encendido por compresión tradicional.

En primer lugar se debe comentar que la inyección debe comenzar en un punto precisamente definido mediante una ley consistente, de esta manera, se asegura que el proceso de combustión maximice el rendimiento y minimice las emisiones contaminantes, reduciendo los gradientes de presión. Esto es lo que se busca a lo largo del proyecto con el uso de un nuevo combustible.

Asimismo, se ha de conseguir que el sistema de inyección sea capaz de funcionar adecuadamente para unas características físicas del combustible con el fin de obtener una mezcla completamente homogénea con el oxidante.

El sistema de inyección es el encargado de introducir el combustible en el motor, y ha de cumplir los siguientes requisitos imprescindibles:

- El combustible ha de ser entregado en la cámara de combustión de acuerdo a la tasa de inyección que se ha mencionado anteriormente, ya que esta ley definirá el

comportamiento, la eficiencia y las emisiones de las diferentes fases de combustión.

- El combustible inyectado ha de ser atomizado con el fin de aumentar la superficie de contacto con el aire caliente y acelerar la evaporización tras la etapa de compresión.
- Obtener una mezcla homogénea con el oxidante dentro de la cámara de combustión.

Una vez introducido el contexto del apartado, se deberá hablar de los dos principales tipos de inyección que se presentan en un motor diésel.

2.2.1. Tipos de inyección

El proceso de inyección es muy importante para una correcta caracterización del motor, ya que determina la eficiencia, el rendimiento, las emisiones del motor, etc. A lo largo de los siguientes apartados, se presentará la principal diferencia entre los dos tipos de inyección de los que se va a hablar, esta se corresponde a la existencia de una precámara donde se inyecta el combustible en los sistemas de inyección indirecta.

■ Inyección Indirecta

En este método de inyección, es el oxidante el responsable de producir los campos difusivos y convectivos para la mezcla, siendo el comportamiento del combustible secundario. Para conseguir esto, el oxidante es encerrado en una precámara en la que se le impone un movimiento de torbellino con el fin de imprimir un movimiento intenso en el que se inyecta el combustible con el fin de elaborar una buena mezcla. Para este sistema, como la presión de inyección posee un papel secundario, no merece la pena invertir en sistemas de inyección demasiado caros o sofisticados.

En los motores diésel, la cámara de combustión se divide en dos secciones, la precámara de inyección de la que se ha hablado anteriormente y que se encuentra alejada en la culata y la cámara de combustión, espacio que separa el pistón y el plano de la culata.

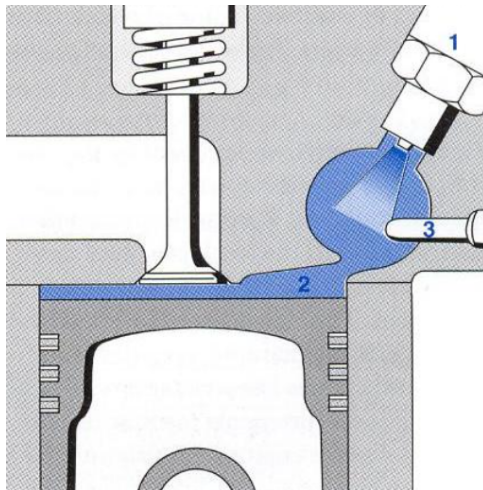


Figura 2.1. Esquema Inyección Indirecta [8]

En la precámara, primera sección de estos motores, se inicia la combustión ya que es el lugar donde se inyecta el combustible. Este combustible es inyectado a una presión relativamente baja (200-400 bar), en relación con otro tipo de presiones que se encuentran en otros sistemas de inyección. Esta baja presión de inyección implica que la calidad del chorro no sea precisamente buena. Este problema se resuelve durante el proceso de combustión, en el que el aire pasa del cilindro a la precámara, cuya geometría forma un vórtice con gran velocidad y turbulencia. De esta forma, pese a la escasa calidad del chorro inyectado, la mezcla es capaz de realizarse en un intervalo lo suficientemente corto, debido también a la turbulencia generada durante la combustión.

Hay que destacar que la combustión en la precámara es incompleta, sin embargo, las altas presiones que se alcanzan permiten al combustible sin quemar avanzar junto a los productos de la combustión correctamente realizada en la cámara principal.

En la combustión rápida se encuentran presiones mayores que en los sistemas de inyección directa, por lo que esto podría poner en peligro la vida del motor, esto se debe a la pérdida de carga del conducto que une la precámara y esta cámara de combustión rápida.

Sin embargo, si se habla de sistemas de inyección indirecta se ha de hablar de las siguientes ventajas:

- Gran dispersión del chorro.
- Menor mantenimiento, esto se debe a que no tienen partes móviles susceptibles de desgaste.
- Sistema de inyección sencillos, ya que las presiones de inyección son bajas.
- Menor costo inicial que los sistemas de inyección directa, que requieren componentes más sofisticados.
- Los motores que presentan este sistema de inyección producen pocas emisiones NOx ya que estos aparecen a altas temperaturas.

Y las desventajas serían las siguientes:

- Menor eficiencia del combustible, debido a que al mezclarse el combustible con el aire antes de la cámara de combustión resulta una mezcla más heterogénea.
- Elevadas pérdidas térmicas.
- Necesidad de implementar bujía de incandescencia en la precámara para posibilitar arranque en frío.
- Por lo general, los sistemas de inyección indirecta tienden a producir menos potencia y par debido a la menor eficiencia del combustible y el menor control sobre la mezcla.

■ Inyección Directa

En los sistemas de inyección directa, no es el oxidante el responsable de la realización de la mezcla, sino el combustible. Por ello, se debe inyectar el combustible a una presión más elevada que en los sistemas de inyección indirecta, para después ser atomizado o repartido, asegurando la mezcla homogénea con el comburente.

En los motores con este sistema es de vital importancia disponer de un sistema de inyección de elevada calidad, lo cuál se puede traducir en un incremento del gasto en este dispositivo.

En este tipo de sistema se encuentran presiones de inyección entre 300 y 3000 bar dependiendo del motor. Al no haber precámara de inyección, como ocurre en los sistemas de inyección indirecta, no existen las turbulencias generadas en ella, ni tampoco pérdidas entre la comunicación de cámaras.

En esta variante, es muy habitual dotar al aire de un movimiento de rotación alrededor del eje del cilindro (swirl), inferido por la pipa de admisión.

En este tipo de inyección, el combustible es liberado en forma de chorro atomizado a la cámara de combustión a través de los orificios de descarga de las toberas, para mezclarse con el aire de la cámara, evaporarse y finalmente quemarse, dando lugar a la combustión Diésel.

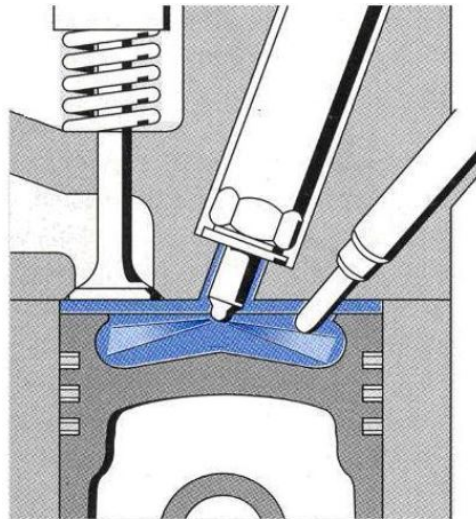


Figura 2.2. Esquema Inyección Directa [8]

Como se ha comentado anteriormente, al desaparecer las turbulencias generadas en la precámara de inyección, la mezcla no es capaz de aprovechar esta situación para homogeneizarse, por ello, se recurren a diversos métodos:

1. Con el fin de que el aire de la admisión forme un remolino en la cara del pistón, se implementan distintas formas de la cámara de combustión, de esta manera, se ayuda a la dispersión del combustible. En la figura [2.3] se muestran diferentes configuraciones de la superficie del pistón.

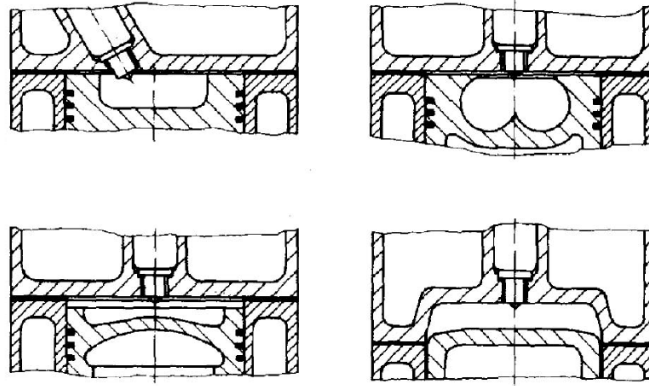


Figura 2.3. Diferentes formas de la cámara de combustión [5]

2. Inyectores de varios orificios que introduzcan chorros de buena calidad, con diámetros de gotas muy reducidos.
3. Altas velocidades del chorro, que se consiguen con altas presiones.

Si se habla de las ventajas de este sistema con respecto al sistema de inyección indirecta se encuentran las siguientes:

- Menor riesgo de detonación, ya que el combustible se inyecta directamente en la cámara de combustión, por lo que se pueden evitar puntos calientes que causen la combustión prematura del combustible.
- Mejor respuesta del motor debido a la mejora de control sobre la tasa de combustible inyectado y del momento de la inyección.
- Menores pérdidas, al eliminarse las pérdidas de carga del flujo pues no existen dos cámaras sino una.
- Menor consumo de carburante.
- La culata del motor es más sencilla de construir debido a la desaparición de la precámara.

Sin embargo, este sistema también presenta inconvenientes:

- Peor proceso de formación de la mezcla debido a la ausencia de turbulencia, por lo que se tiene una peor combustión finalmente. Se pueden solucionar parcialmente con la integración de pequeños orificios y altas presiones.
- Aumento de presión brusco, produciendo un elevado ruido del motor. Este aumento se puede compensar mediante pre-inyecciones.
- Mayor complejidad de este sistema pues se necesitan más componentes y tecnologías adicionales, como bombas de alta presión, reguladores de presión, etc.

■ Tipos de sistema de inyección directa

Dos de los sistemas de inyección más comunes en el sector de la automoción son dos sistemas de inyección directa, estos sistemas son el *common rail* y el *integrado*

- **Sistema integrado** En este sistema de inyección, se halla una unidad compacta en la culata del motor que está formada por la bomba, el inyector y la válvula electromagnética. La culata es accionada mecánicamente por una leva y electrónicamente por la unidad de control electrónica (ECU), al igual que el sistema interior. Cabe destacar que este sistema se utilizó durante varias décadas, sin embargo, en la actualidad ya no se utiliza casi, el más común es el common rail [2.2.1].

Este sistema de inyección, al árbol de levas imprime un movimiento directo a un balancín, y este acciona al inyector. La leva del inyector bomba es ubicada en el árbol de levas y posee un flanco de ataque muy pronunciado. Esta característica permite generar una alta presión de inyección.

- **Sistema common rail**

En este sistema, la bomba de alta presión, accionada por el cigüeñal del motor, es alimentada por el combustible del depósito que toma otra bomba de baja presión. En este momento, la bomba de alta presión expulsa el combustible hacia el raíl, en el que están conectados los inyectores de los diferentes cilindros del motor, siendo la mayor parte del combustible inyectado en la cámara de combustión y una pequeña parte dedicada al pilotaje hidráulico de los inyectores. Este volumen de combustible constituye el caudal correspondiente al retorno de los inyectores.

El raíl común actúa como un acumulador, este raíl, además de esta función, también trabaja como elemento amortiguador de las oscilaciones de presión y de las perturbaciones generadas por la salida del combustible.

Este sistema se representa en el esquema de la figura [2.4].

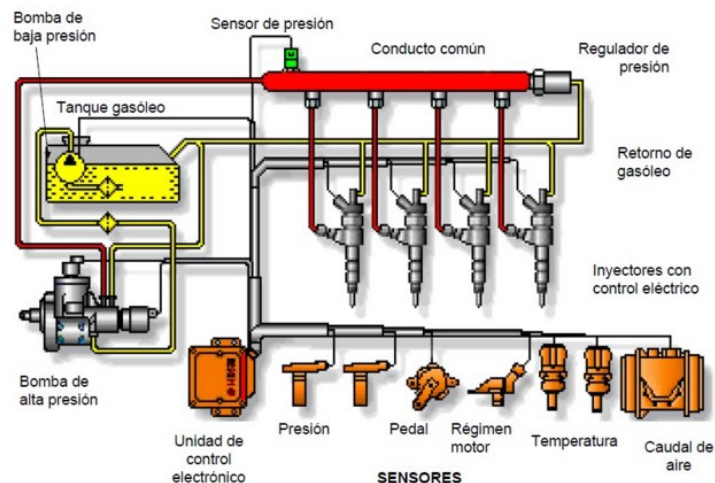


Figura 2.4. Diagrama del sistema de inyección common rail [9]

Una vez presentado este sistema, que es el más utilizado en cuanto a sistemas de inyección se refiere, en el apartado [2.2.2] se mostrarán los componentes más importantes.

2.2.2. Partes del sistema

En este apartado se citarán y explicarán los distintos componentes presentes en un sistema de inyección common rail [2.5], ya que además de ser el más utilizado en la industria mecánica, es el que se utiliza en la instalación experimental de este proyecto, aunque hay que tener en cuenta que dicha instalación presenta solo un inyector, por lo que el resto de salidas del raíl se encuentran bloqueadas.

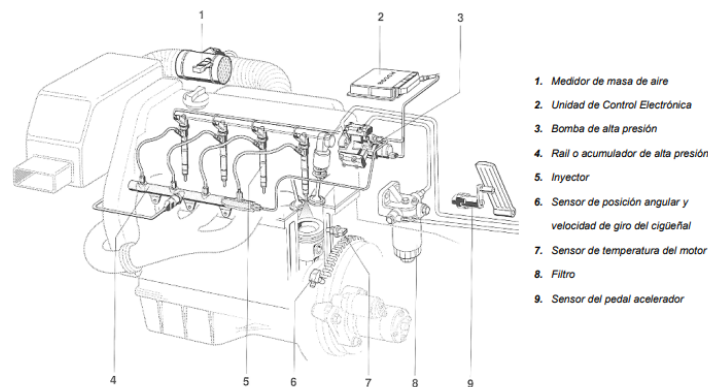


Figura 2.5. Diagrama del sistema de inyección common rail, 2. [12]

Bomba de baja presión

Este componente puede ser eléctrico o de accionamiento mecánico y es el responsable de aspirar el combustible del depósito para abastecer la bomba de engranajes que suele ser de pistones radiales y se ubica en la bomba de alta presión [2.2.2].

Bomba de alta presión

La bomba de inyección es el elemento encargado de generar la elevada presión necesaria para realizar el proceso de inyección.

Se suele escoger la bomba de tres émbolos dispuestos radialmente y separados 120° entre sí, de esta manera, no se necesita un gran par siendo el suministro constante. Ver figura [2.6].

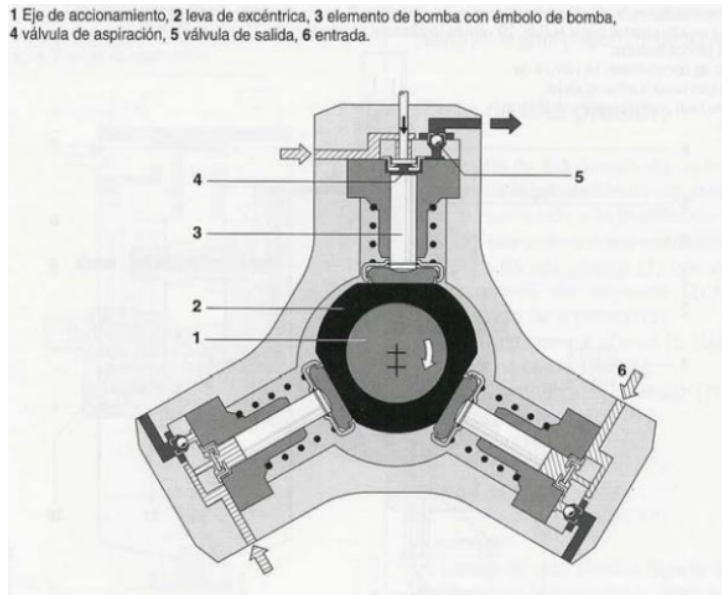


Figura 2.6. Sección de una bomba de alta presión de tres émbolos [12]

La válvula de admisión se abre regulada por este émbolo, cuando se mueve hacia abajo este émbolo, se aspira el combustible dentro de la cámara. Por lo que en el PMI se cierra de nuevo esta válvula bloqueando el recinto, de esta manera, el combustible se somete a compresión por el movimiento hacia arriba y hacia abajo del émbolo hasta alcanzar la presión del raíl, momento en el que el combustible pasa al circuito de alta presión.

Cuando se alcanza el PMS, el émbolo deja de transportar el combustible al raíl provocando una pérdida de presión en el recinto de la bomba. Sin embargo, este proceso no es perfecto, por lo que en el recinto de la bomba quedan restos de combustible. La presión continuará disminuyendo hasta que la presión de la bomba de alimentación sea mayor, momento en el que se abre de nuevo la válvula de entrada de combustible, comenzando de nuevo el proceso.

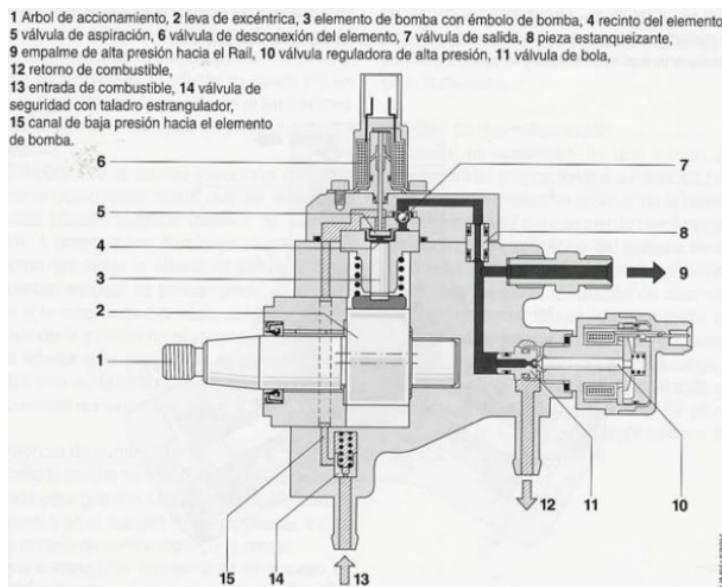


Figura 2.7. Esquema de una bomba de inyección de alta presión[12]

Líneas de alta presión

Estos conductos son aquellos que comunican los componentes en los que el combustible ya circula a una presión elevada (bomba de alta presión y raíl, entre otros). Estos conductos han de soportar grandes cargas de presión aportadas por la bomba, al igual que las oscilaciones o pulsos producidas por el suministro y las pausas de inyección.

Raíl o acumulador

En cuanto al raíl o acumulador de alta presión se trata de un conducto forjado en acero que se encarga de distribuir el combustible a alta presión a todos los inyectores, como se puede observar en la figura [2.8].

La finalidad del raíl es que la inyección de combustible sea continua y precisa en el tiempo, es decir, que la inyección del combustible sea exactamente la misma en dos intervalos de tiempo idénticos.

En el raíl, el combustible es ligeramente presurizado, por eso también es denominado acumulador de alta presión.

A su vez, este componente se encarga de amortiguar las oscilaciones de presión propias de la bomba de inyección.

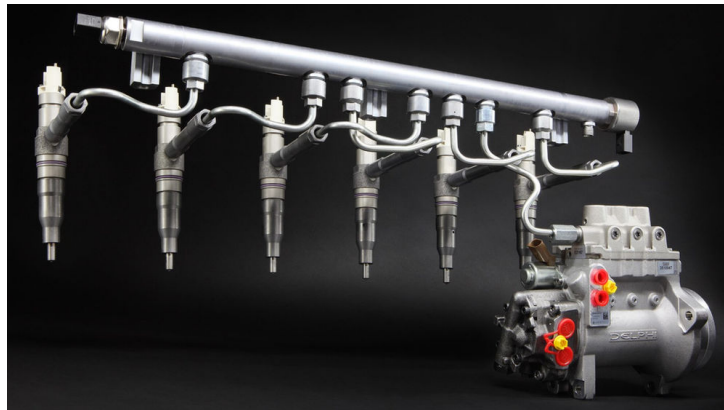


Figura 2.8. Raíl [10]

Sensor de presión

Este sensor se encarga de registrar la presión instantánea del combustible en el raíl, por lo que suele ubicarse en el extremo libre del mismo.



Figura 2.9. Sensor de presión [6]

Regulador de presión

Este componente forma parte del raíl y tiene la función de ajustar la presión del circuito de alta presión en general, con el fin de garantizar el error mínimo en cuánto a presión se refiere y asegurar el buen funcionamiento del sistema de inyección.

Su principio de funcionamiento consiste en producir una fuga de combustible hacia el retorno, ya que como es obvio, la presión del raíl es inversamente proporcional a la cantidad de combustible que envíe el regulador en retorno.

Esta electroválvula se encuentra abierta en su estado de reposo, y se cierra dicha válvula cuando se activa, incrementando la presión en el raíl.

Dicho de otra manera, el regulador de presión se encarga de compensar los volúmenes entre las ondas de alta y baja presión del combustible, evitando la formación de burbujas ocasionadas en la parada del motor.



Figura 2.10. Regulador de presión [7]

Inyector

Los movimientos de apertura y cierre del inyector son controlados por la ECU del sistema de inyección, que es la que se encarga de controlar la duración de la inyección, la presión de la inyección, la cantidad de combustible inyectado, etc.

Por todo este trabajo y responsabilidad, se dice que el inyector es la parte más compleja e importante.

En función del sistema de accionamiento interno del inyector se distinguirán dos tipos de inyectores. inyector de tipo solenoide o inyectores de tipo piezoeléctrico:

■ Inyector de tipo solenoide

Un inyector con válvula de tipo solenoide está compuesto de una válvula electro-magnética, el cuerpo y la aguja que juntos forman la tobera; y por último quedan las partes del porta-inyector, rácor de alta presión, filtro, el cuerpo del inyector y el muelle de la tobera.

Todas estas partes son representadas esquemáticamente en la figura [2.11].

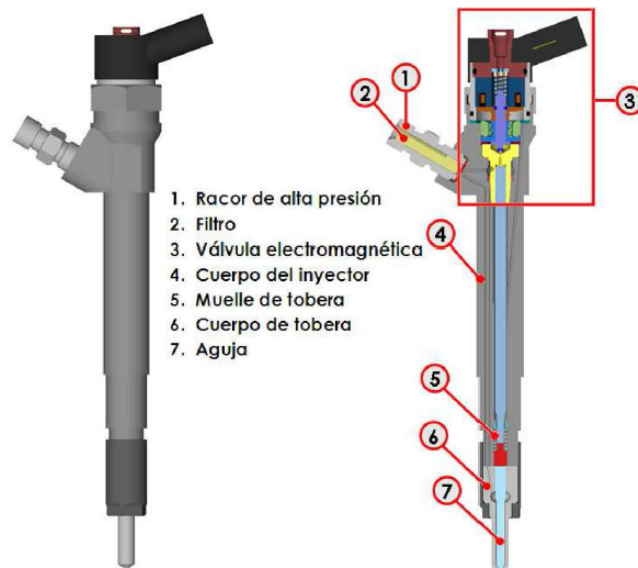


Figura 2.11. Inyector de un sistema common rail de tipo solenoide [18]

La válvula electromagnética corresponde a una servoválvula que puede estar abierta o cerrada y dos pequeños orificios activos, entrada y salida del volumen de control. El principio de funcionamiento de este componente se describe a continuación, para apoyar la descripción se tiene la figura [2.12].

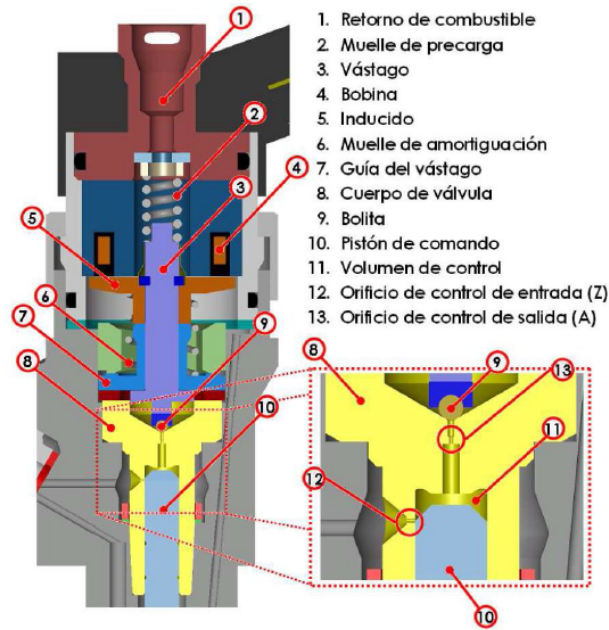


Figura 2.12. Válvula de accionamiento tipo solenoide de un inyector common-rail [18]

Como bien se sabe, el combustible debe llegar a una elevada presión dentro del inyector, una vez dentro el inyector es filtrado y bifurcado en dos direcciones, un conducto se dirige hacia la parte que alimenta la tobera y la otra parte de combustible llega por el segundo conducto a la parte superior del pistón con el fin de alimentar el volumen de control.

Cuando no está activado el solenoide, el combustible se mantiene a la presión de raíl debido a que el vástago ocupa su posición de reposo, no produciéndose la inyección debido al bloqueo de los orificios de la tobera.

Para comenzar el proceso de inyección, la ECU emite un pulso del que depende el tiempo de inyección, y por ende, la cantidad de combustible inyectado. Asimismo, se recuerda que la cantidad de combustible inyectado depende directamente del número y diámetro de los orificios de la tobera, además del tiempo de energización de la electroválvula.

El pulso eléctrico emitido por la ECU excita la bobina generando un campo magnético e induciendo consigo una fuerza que asciende por el vástago, como el que se observa en la figura [2.12], de esta manera, se libera la esfera, y se bloquea el orificio de salida del volumen de control, produciendo una pérdida de presión en el mismo. Esta pérdida de presión es la responsable de la diferencia de presiones que provocará que el conjunto pistón-aguja se levante y desbloquee los orificios de la tobera.

La inyección será continuada mientras la bobina siga excitada, por lo que el fin de la inyección ocurrirá cuando desaparezca el pulso eléctrico. Cuando el pulso eléctrico se extingue, el vástago de la electroválvula vuelve a su posición, al igual que la esfera, bloqueando de nuevo la inyección.

■ Inyector de tipo piezoeléctrico

Con el fin de mejorar las prestaciones de los inyectores, como podría ser, reducir los tiempos de respuesta, se introdujeron este tipo de inyectores.

El funcionamiento de este tipo de inyectores es bastante parecido al que se acaba de comentar, con la presencia de un núcleo cerámico en los piezoeléctricos. Dicho núcleo tiene la función de expandirse o comprimirse cuando recibe un pulso de voltaje.

Una vez superado el primer problema para la implementación de este inyector en la industria (baja dilatación), la principal ventaja radica en una mayor velocidad del movimiento de la válvula ya que los movimientos de estos elementos ocurren a una elevada velocidad, permitiendo una inyección más precisa y más inyecciones por ciclo.

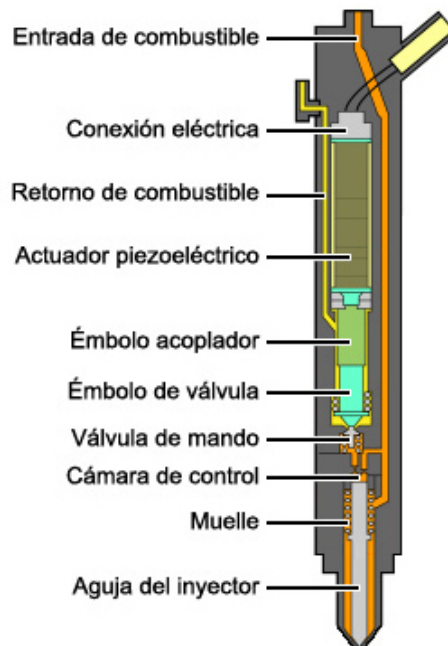


Figura 2.13. Funcionamiento del inyector piezoeléctrico [11]

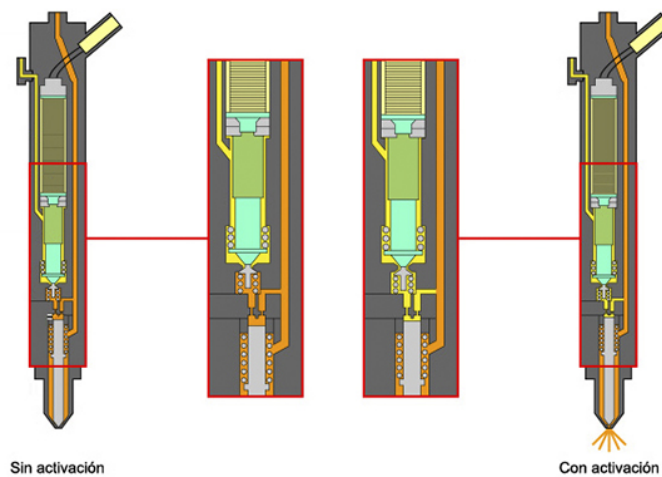


Figura 2.14. Inyector piezoeléctrico activado y desactivado [11]

2.3. Requerimientos que tiene que cumplir un sistema de inyección

En cuánto al sistema de inyección, para un correcto desarrollo experimental, se necesita que cumpla con los siguientes requisitos:

- El sistema ha de ser capaz de inyectar la cantidad precisa de combustible en el momento y lugar adecuado con el fin de obtener una combustión óptima y maximizar la eficiencia del motor.
- Se ha de mantener una presión de inyección adecuada con con el fin de garantizar una atomización eficaz del combustible.
- Debe tener la capacidad de reacción suficiente para ajustar la cantidad de combustible ante cambios en las condiciones de funcionamiento del motor, como podría ser la aceleración o desaceleración.
- Asimismo, el combustible debe ser pulverizado en pequeñas gotas, con el fin de mejorar el proceso de mezcla, asegurando una combustión completa y reduciendo las emisiones.
- Se debe asegurar una mezcla homogénea de combustible con el oxidante en todos los cilindros para conseguir un rendimiento uniforme y una combustión eficiente.
- En este proyecto sobre todo, es muy importante que exista la compatibilidad con diferentes tipos de combustibles, los que interesan en este caso son el amoníaco y el diésel.
- Maximizar la eficiencia energética, esto se consigue maximizando la cantidad de energía producida a partir del combustible utilizado.
- Debe ser posible diagnosticar problemas y llevar a cabo el mantenimiento del sistema de manera eficiente para garantizar un funcionamiento óptimo del motor a largo plazo.
- Minimización de las emisiones contaminantes del motor.

2.4. Descripción del combustible

El amoníaco ha ganado mucha atención debido a sus propiedades con el fin de ser uno de los combustibles del futuro debido a sus diversas ventajas. A lo largo de la sección se describirá el amoníaco como combustible para después explicar sus propiedades físicas y químicas.

En cuanto al proceso de producción de amoníaco, tiene su base en el proceso Haber-Bosch [1.1], proceso en el cuál se involucra el gas nitrógeno con el gas hidrógeno en presencia de un catalizador, el proceso consiste en los siguientes pasos:

1. Se fija el nitrógeno obtenido del aire con el fin de mezclarlo con el hidrógeno para la formación del combustible.
2. Se obtiene el gas hidrógeno, este, puede ser obtenido de varias fuentes como gas natural, biomasa o electrólisis del agua.
3. El gas nitrógeno y el gas hidrógeno a elevada presión se combinan en una vasija de reactor en presencia de un catalizador de hierro provocando una reacción exotérmica, después el amoníaco se enfría y se recoge para su uso.

Con el objetivo de cumplir las normativas de emisiones futuras ya son muchos los que plantean el amoníaco como un combustible del futuro para vehículos pesados, motores de combustión interna, marinos, aviación, etc. Al ser un combustible neutro en carbono, el amoníaco tiene el potencial de reducir las emisiones con el fin de reducir los gases de efecto invernadero y contribuir a un futuro más sostenible.

Además, otra de las ventajas que firma el amoníaco es que es capaz de ser producido a partir de energías renovables, de esta manera, se reducirá la dependencia de combustibles fósiles y se establecerá la transición hacia un sistema energético más verde.

2.4.1. Propiedades físicas del amoníaco

A continuación, se describirán algunas de la más relevantes propiedades físicas del amoníaco:

- El amoníaco es un gas a temperatura y presión ambientes, sin embargo, cuando su temperatura baja o se somete a presión puede condensarse en un líquido incoloro con el característico olor penetrante del amoníaco. Por lo que se podría decir que la capacidad de coexistir en diversos estados físicos hace del amoníaco un componente versátil para distintas funciones.
- En cuánto al punto de ebullición y el punto de fusión del amoníaco son relativamente bajos en comparación con otros compuestos químicos, lo que de nuevo hace llegar a esa versatilidad de la que se ha hablado, ya que el amoníaco puede evaporarse y solidificarse a temperaturas relativamente bajas, facilitando su manipulación y su uso en diversas aplicaciones. La baja temperatura de ebullición hace que el amoníaco sea útil en sistemas de refrigeración, ya que puede evaporarse fácilmente para extraer calor de su entorno.
- La densidad del amoníaco es variable según su estado físico. En estado gaseoso, el amoníaco es menos denso que el aire, por lo que tiende a elevarse. Esto es importante considerarlo en términos de seguridad, ya que los vapores de amoníaco pueden acumularse en áreas mal ventiladas.
- Cuando se liquida el amoníaco es más denso que el agua, lo que significa que tiende a hundirse en ella. Esta propiedad es relevante términos de almacenamiento y manipulación de líquidos que contienen amoníaco.

- El amoníaco también es conocido por su magnífico poder refrigerante y se ha utilizado a lo largo de la historia en sistemas de refrigeración industrial y comercial. Tiene una capacidad de refrigeración significativa y es eficaz en una amplia gama de temperaturas. Todo esto unido a las ventajas que se conocen en cuanto a impacto ambiental, hacen del amoníaco una opción atractiva en aplicaciones de refrigeración.
- El amoníaco presenta una elevada presión de vapor a temperatura ambiente, esto significa que puede evaporarse fácilmente y formar vapores inflamables en el aire. Esto puede representar un riesgo de seguridad en áreas mal ventiladas o en presencia de fuentes de ignición, como se ha comentado anteriormente, por lo que es importante almacenar y manipular este combustible de manera segura.

2.4.2. Propiedades químicas del amoníaco

El amoníaco, con la fórmula NH_3 , es un gas incoloro que está formado por un átomo de nitrógeno unido a tres átomos de hidrógeno, dotando al nitrógeno de tres electrones más para cumplir con el estado de gas ideal.

Dicho compuesto tiene un olor acre y presenta una elevada solubilidad en agua, alguna de las características químicas más importantes serían las siguientes:

- El amoníaco presenta un alto contenido en hidrógeno, lo que lo convierte en una posibilidad de obtener este gas de manera relativamente sencilla.
- Al igual que se ha citado en el apartado [1.3], el amoníaco no contiene átomos de carbono, lo que significa que su combustión no produce CO_2 , por ello se plantea como una alternativa a los combustibles fósiles.
- Alta reactividad del amoníaco con oxidantes como puede ser el O_2 esta reactividad es la base de su capacidad como combustible, ya que la reacción de combustión con este oxidante es exotérmica (libera energía térmica en forma de calor). Sin embargo, esta característica supone que existan problemas en términos de seguridad y fiabilidad ya que el almacenamiento de amoníaco tiene un elevado riesgo de incendios y explosiones en presencia de agentes oxidantes.
- El amoníaco tiene una elevada densidad energética, lo que significa que puede almacenar una cantidad significativa de energía por unidad de volumen, por esta razón entre otras, es considerado por algunos como el combustible del futuro.
- El amoníaco presenta tendencia a la formación de complejos de coordinación con metales, esto tiene su relevancia en la catálisis heterogénea donde dichos complejos pueden actuar como catalizadores, es decir, acelerar diversas reacciones químicas.
- El amoníaco es altamente soluble en agua, lo que significa que puede disolverse fácilmente para formar una solución acuosa de amoníaco. Esta solución es básica cuando el amoníaco reacciona con el agua, esta propiedad es la que le hace estar presente como limpiador doméstico ya que una solución acuosa de amoníaco puede descomponer la grasa y la suciedad.

- A su vez, al tratarse de un compuesto formado por nitrógeno, se podría esperar que las emisiones de NO_x fuesen elevadas, sin embargo, dicho pensamiento está lejos de la realidad, ya que la tecnología actual permite que dichas emisiones puedan ser controladas mediante el uso de catalizadores selectivos de reducción de NO_x (SCR).
- Otras posibles desventajas vendrían de la mano de la toxicidad del amoníaco y de su alto peligro para el ser humano ya que de ninguna manera el olfato humano está preparado para inhalar este compuesto. Esta desventaja hace plantearse, en el caso de que se consiga certificar como el combustible del futuro, cuál sería su posible almacenamiento garantizando siempre la seguridad de la naturaleza.
- El amoníaco también presenta menor poder calorífico si se compara con el combustible fósil.

Asimismo, el amoníaco provoca menores emisiones de contaminantes dañinos, tales como SO₂ y partículas finas si lo comparamos con el combustible fósil.

2.4.3. Comparación entre diésel y amoníaco

Con el fin de resumir las diferencias y semejanzas, en la tabla [2.4.1] se encuentra la comparación entre ambos combustibles.

Diésel	Amoníaco
Líquido a temperatura ambiente	Gas a temperatura ambiente
Elevados puntos de fusión y ebullición	Punto de fusión y ebullición bajos
Alto poder calorífico	Poder calorífico medio
Elevadas emisiones de CO ₂ y elevadas emisiones de NO _x	Nulas emisiones de CO ₂ y bajas emisiones de NO _x
Fácil almacenaje y aplicación sencilla y conocida	Componente altamente tóxico y difícilmente manipulable
Complejo y finito proceso de obtención	Posibilidad de obtención con nulas emisiones

Tabla 2.4.1: Comparación entre Diésel y Amoníaco

Con el fin de realizar un análisis más exhaustivo y más cuantitativo de las propiedades de ambos combustibles se presenta la tabla [2.4.2]

Propiedad	Diésel	Amoníaco
Composición	C _{15,18} H _{29,13}	NH ₃
Peso molecular (g/mol)	211.19	17
Densidad a 15°C (kg/m ³)	840	600
Viscosidad (cP) a 25°C	3	0.115
Poder calorífico (MJ/kg)	43.1	22.5
Punto de fusión (K)	258	195.48
Punto de ebullición (K)	563	239.87
Dosado estequiométrico	1/14.87	1/6.09

Tabla 2.4.2: Comparación entre Diésel y Amoníaco cuantitativa

2.5. Descripción proceso de inyección

En el presente apartado se explicarán los fundamentos teóricos que formarán la base del proyecto, se dividirá en dos apartados, la teoría para la determinación de la tasa de inyección y masa inyectada y la teoría utilizada para la determinación del flujo de cantidad de movimiento.

2.5.1. Determinación de la tasa de inyección y masa inyectada

Una de las principales características de un sistema de inyección es la tasa de inyección, también denominada ley de entrega de combustible. Este parámetro es definido como el caudal instantáneo a la salida del orificio u orificios del inyector. El instrumento que permite su medida se denomina caudalímetro o tasímetro.

En cuanto al principio de funcionamiento se considera un volumen de control constituido por una porción de tubo de sección A_t y longitud suficiente. Para ello, se suponen despreciables los efectos de la gravedad, siendo la presión la única fuerza considerada sobre el volumen de control. Por lo que, desde la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento se llega a lo siguiente:

$$(p_0 + \Delta p)A_t - p_0A_t = \rho A_t c \Delta u \quad (2.1)$$

Simplificando esta ecuación se llega a la ecuación de Allievi:

$$\Delta p = \rho c \Delta u \quad (2.2)$$

Tras depender la velocidad del sonido de la temperatura y de la presión del carburante, será necesario obtener una correlación con base en [15]:

$$c = k_1 + k_2(T - T_0) + k_3(p - p_0) + k_4(p - p_0)^2 + k_5(p - p_0)(T - T_0) \quad (2.3)$$

Sin embargo, con el fin de obtener una mayor precisión, al ser modificados los coeficientes del polinomio años más recientes, se emplearán los calculados por Bracho G. en 2019 [17]. Se pueden observar en la tabla [2.5.1]

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
1440.89	-3.11349	3.9401	-0.0070	0.0094

Tabla 2.5.1: Coeficientes polinomio de la correlación de la velocidad del sonido

Por lo que relacionando las ecuaciones [2.1] y [2.2] se consigue la expresión esperada para el caudal en función de la variación de presión, el área de la sección y la velocidad del sonido.

$$\dot{m} = \frac{A_t}{c} \Delta p \quad (2.4)$$

Para determinar la cantidad de masa inyectada el proceso es mucho más trivial y tan solo necesita una balanza, un depósito en el que verter el combustible y conductos de salida.

Situando una balanza de elevada precisión (0.01g) y conduciendo el combustible una vez inyectado y presurizado hasta un depósito sobre la balanza solo quedaría ajustar la balanza a la masa del depósito para obtener la masa de combustible depositado, que mediante el programa *xbalancín* permite representar la evolución de la masa de combustible inyectada y poder establecer una alarma que permita avisar cuando el depósito se esta quedando sin combustible.

2.5.2. Determinación de la medida de cantidad de movimiento

En cuánto al flujo de cantidad de movimiento es una de las magnitudes más importantes en la caracterización del chorro ya que ostenta la información correspondiente a los acontecimientos que tienen lugar dentro del inyector. Este se caracteriza midiendo la fuerza del impacto del chorro con una pequeña placa enfrentada al orificio que correspondida:

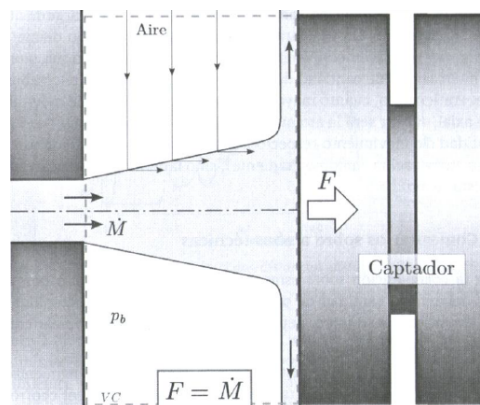


Figura 2.15. Principio de medida del flujo de cantidad de movimiento [18]

El principio físico de esta pequeña placa consiste en un captador de presión piezoeléctrico calibrado con el objetivo de medir dicha fuerza, esta diana ha de tener la suficiente sección para captar todo el chorro de manera que tras el impacto salga en dirección perpendicular. Por lo que con base en la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, la fuerza medida por el captador es equivalente al flujo de cantidad de movimiento, como se puede observar en la figura [2.15].

Sin embargo, además de esta medida, el flujo de cantidad de movimiento (junto con la tasa de inyección) ayudará a determinar la velocidad efectiva de inyección del combustible y la sección efectiva de inyección, importantes parámetros indicadores de las prestaciones del sistema de inyección, al igual que la rapidez y flexibilidad del mismo.

Para deducir ambos parámetros se supone un flujo a la salida de los orificios, que se representa en la figura [2.16], donde se aprecia que el flujo a la salida define un perfil de densidad. De otro lado, el flujo equivalente sale al exterior a través del área geométrica

real, esta situación se simplifica considerando flujo equivalente que fluye a través de un área efectiva, con una densidad constante y una velocidad efectiva también constante.

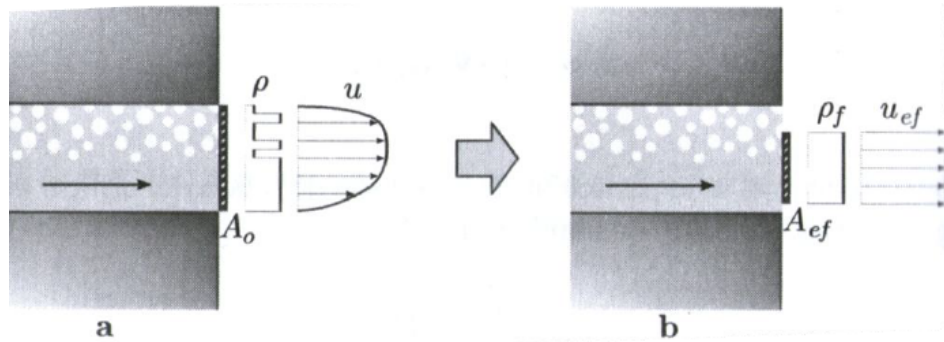


Figura 2.16. Representación del flujo a la salida de una tobera en una situación real (a) y equivalente (b) [18]

El gasto másico se calcula en función de las variables características del flujo según la ecuación [2.5]:

$$\dot{m}_f = \int_{A_0} \rho u dA = A_{ef} \rho_f u_{ef} \quad (2.5)$$

quedando el flujo de cantidad de movimiento como:

$$\dot{M}_f = \int_{A_0} \rho u^2 dA = A_{ef} \rho_f u_{ef}^2 \quad (2.6)$$

Por lo que como se ha citado anteriormente, se pueden obtener tanto la velocidad efectiva [2.7] como el área efectiva a la salida de la tobera [2.8]:

$$u_{ef} = \frac{\dot{M}_f}{\dot{m}_f} \quad (2.7)$$

$$A_{ef} = \frac{\dot{m}_f^2}{\rho_f \dot{M}_f} \quad (2.8)$$

2.6. Necesidad de caracterizar los sistemas de inyección para el NH_3

Para poder explicar bien por qué se ha de caracterizar el amoníaco se tomará como referencia la gráfica [2.17], en la que se representan resultados del proceso de inyección de amoníaco y diésel del paper [14].

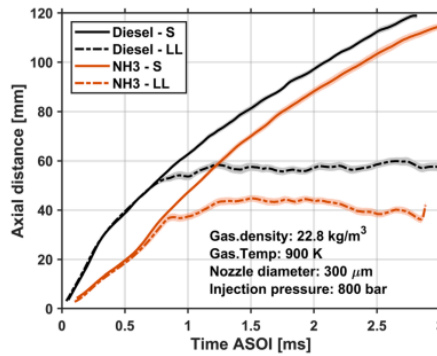


Figura 2.17. Evolución del chorro de los combustibles diésel y amoníaco en estado líquido y gaseoso [14]

En esta figura, se puede apreciar la diferencia que hay inicialmente en la inyección de ambos combustibles, por lo que a lo largo del paper [14] se trata de analizar dicha incongruencia y darle explicación científica, al igual que en el presente apartado en el que se resaltarán los resultados más relevantes.

Que la curva del combustible diésel esté por encima de la del amoníaco para un avanzado ASOI tiene su explicación en las características de cada combustible. Sin embargo, también se observaron diferencias relevantes al principio del proceso de inyección, correspondientes a la fase de apertura. Por ello, era muy importante la caracterización de dicha diferencia ya que de ello depende la dinámica del sistema de inyección.

Por lo que para obtener información del comportamiento hidráulico de la dinámica del sistema de suministro de combustible y por tanto, para caracterizar esta diferencia se recurrió a un modelo 1D desarrollado por el CMT.

Este modelo se basa en hipótesis controladas por la mezcla que son descritos en el paper [13]. En dicho modelo, se supone que el chorro es inyectado en un entorno cuasiestacionario y que el intercambio de momento con el gas circundante conduce al aumento de radio del chorro a medida que el chorro avanza en dirección axial. El dominio computacional se divide en un número de celdas en las que la velocidad en el eje y la fracción de masa de combustible se obtienen mediante la resolución de las ecuaciones de conservación de momento y de masa. Se asumió un perfil radial a lo largo de esta dirección en la zona completamente desarrollada para permitir una solución unidimensional.

Las principales variables de entrada del modelo consistían en condiciones termodinámicas y la evolución temporal de la inyección (tasa de inyección y flujo de cantidad de movimiento). Sin embargo, no fue posible medir la tasa de inyección (ROI) de amoníaco líquido bajo las condiciones de operación. En su lugar, se empleó una ROI educada utilizada dentro del consorcio ECN (Engine Combustion Network) como una primera aproximación. Además, para adaptar la tasa de inyección a toberas más grandes, la ROI del modelo se escaló de acuerdo con los diámetros correspondientes y la pendiente del periodo fue reducida de manera considerable.

La configuración de las entradas para este modelo serían las siguientes:

Item	Diesel	Ammonia
Spray angle, θ_1 [°]	15	13
Spray angle, θ_2 [°]	26	26
Intact length, IL [mm]	57	48/36
Nozzle diameter [μm]	300	300/250
Area coefficient C_a [-]	0.98	0.98
Discharge coefficient C_d [-]	0.8	0.8

Figura 2.18. Configuración de entradas para el modelo 1D [14]

Una vez analizados los resultados, se establecieron que las principales diferencias del comportamiento tenían la base en la volatilidad del amoníaco, como se ve en la figura [2.19], apreciando valores de temperatura de rocío y de burbuja mucho más bajos.

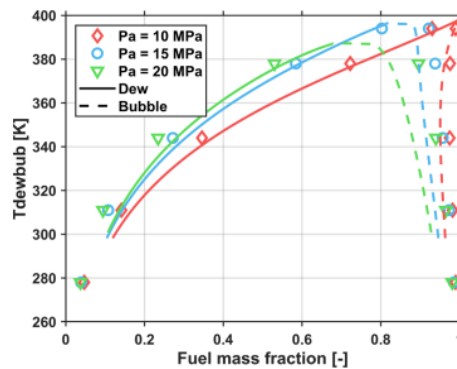


Figura 2.19. Curvas de rocío y de burbuja para amoníaco a diferentes presiones ambiente [14]

Una segunda diferencia es el aumento mucho menor en la temperatura del amoníaco al moverse hacia una fracción de mezcla más baja, es decir, avanzando desde estados de líquido puro hasta vapor puro, esto es producto del alto calor latente de vaporización. El valor de la evaporación de la fracción de masa de combustible en el final del chorro líquido es ligeramente más bajo para el diésel (0.27) que para el amoníaco (0.34), pero hay una gran diferencia en la temperatura correspondiente, 600K en el caso del diésel y 330K en el caso del amoníaco, esto tendría un fuerte efecto en un posible inicio de reacciones químicas, si fuese un caso reactivo.

La validación del modelo 1D en la inyección de combustible líquido y gaseoso se aprecia en la siguiente figura:

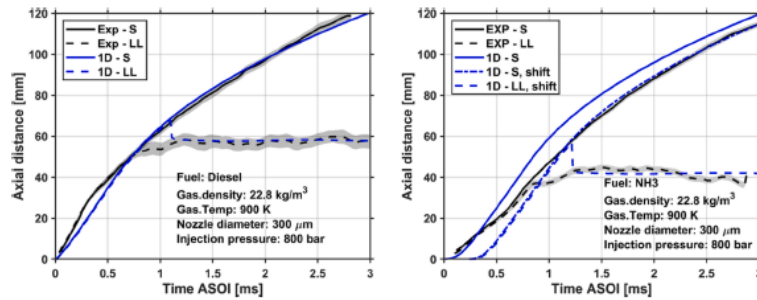


Figura 2.20. Validación del modelo 1D para el chorro líquido y gaseoso de los combustibles diésel (izquierda) y amoníaco (derecha [14])

Por lo que, como conclusión del apartado tenemos que tras emplear un modelo de análisis del chorro unidimensional para analizar sus características, durante la fase inicial de la inyección se observa un incremento lineal de la inyección con el tiempo, con una transición posterior a una fase de inyección controlada por la mezcla. En comparación con el diésel, el amoníaco muestra una velocidad de propagación más lenta en la fase inicial y una velocidad de propagación similar en la zona en la que ambos se encuentran completamente desarrollados. El retraso inicial en el inicio de la inyección para el amoníaco resulta en una inyección más corta tanto para las fases líquida y gaseosa. Una tobera más grande o una presión de inyección más baja causa un aumento más lento en el levantamiento de la aguja y una propagación más lenta en la fase inicial.

Similar al diésel, la longitud líquida con amoníaco eventualmente alcanza un valor cuasiestacionario que sigue tendencias similares a las encontradas en la literatura para el chorro diésel. La longitud líquida es más corta con el aumento de la temperatura ambiente y la densidad del gas, y con el aumento del diámetro de la tobera, y casi no se ve afectada por la presión de inyección. Los valores experimentales derivados pueden normalizarse en función de conceptos de control de mezcla dentro de una incertidumbre del 6.3 %.

El perfil de chorro similar en la fase de vapor entre el diésel y el amoníaco sugiere una correlación similar de la penetración de vapor con la densidad ambiente, el diámetro de la tobera, la velocidad de inyección y el ángulo de pulverización, siendo insignificante el efecto de la temperatura ambiente.

La aplicación del modelo unidimensional ha demostrado que se pueden proporcionar predicciones razonables para las métricas de chorro más relevantes, es decir, para la inyección en la punta y la longitud líquida cuasiestacionaria. Esto confirma que, excepto en el período inicial transitorio de inyección, el comportamiento del chorro de amoníaco de inyección a alta presión sigue las tendencias del diésel, especialmente evidente para el caso cuasiestacionario, que puede predecirse basándose en argumentos de control de mezcla.

Sin embargo, se necesitan mayores esfuerzos para resolver el período de inicio de la inyección y entender el comportamiento del amoníaco dentro del cuerpo del inyector que puede resultar en el lento aumento de la aguja. Además, la cuantificación de las formas de la tasa de inyección también pasa a considerarse una condición de contorno crítica para la cuantificación de la evolución del chorro en cualquier tipo de modelo predictivo.

Capítulo 3

Metodología

A lo largo de este capítulo se tratará de realizar una descripción exhaustiva de la instalación de tasa y de cantidad de movimiento. A su vez, se explicarán los diagramas de conexiones entre dispositivos necesarios para la obtención de las medidas y resultados que serán posteriormente analizados en el apartado [4]. Por ello, este apartado será desglosado en dos subapartados, el primero tratará los dispositivos y herramientas que son necesarios en las dos instalaciones (medida de tasa y medida de cantidad de movimiento), el segundo apartado por su parte consistirá en la descripción del software utilizado para la obtención de las señales en el ordenador y las medidas necesarias para su posterior postprocesado.

3.1. Dispositivos y herramientas

3.1.1. Maqueta de medida de tasa de inyección

Como ya se ha explicado a lo largo del apartado [2.5.1], a través de esta maqueta se calcula el gasto másico instantáneo tras la inyección de combustible. Esta sencilla medida es capaz de proporcionar información sobre la forma del gasto másico, cuanto se inyecta y cómo se inyecta para unas condiciones dadas. Estos parámetros son condiciones de contorno importantes para el funcionamiento del motor, y su conocimiento puede ayudar a definir estrategias para la reducción de ruido y de emisiones contaminantes.

El dispositivo utilizado en la instalación de tasa es conocido como el sistema Bosch de tubo anecoico. En la figura [3.1] se observa el tasímetro utilizado a lo largo del proyecto.



Figura 3.1. Tasímetro utilizado en instituto CMT

El tasímetro es un instrumento compuesto por un pistón que separa las dos cámaras presentes en él. Una de las cámaras mantiene la presión en el cilindro, también llamada contrapresión, alimentada por nitrógeno, por lo que este aparato deberá tener también una recepción del mismo, con el fin de evitar la formación de burbujas. Como se espera, el combustible y el nitrógeno nunca llegan a estar en contacto debido a que estos siempre estarán separados por el pistón que separa las cámaras, este pistón realiza un movimiento longitudinal manteniendo el equilibrio de presiones entre ambas cámaras.

En este sistema, el inyector está montado sobre una cámara cerrada llena de combustible en el que mediante una válvula de regulación de presión, que es capaz de mantener el interior del tasímetro a la presión de descarga y contrapresión deseada.

Una vez comienza la inyección, una onda de presión es generada, esta onda atraviesa el tubo de sección constante hasta el depósito del tasímetro.

Al encontrarse con dicho depósito, existe un cambio de diámetro que produce una onda reflejada que podría afectar la señal de presión medida, hecho que hay que tratar de evitar mediante el dimensionamiento del tubo, siendo la relación entre la longitud del tubo y el diámetro lo más grande posible.

Una vez explicado esto, el proceso de medida sería el descrito en el apartado [2.5.1].

A continuación se desglosará la instalación en su parte hidráulico-neumática y en la parte eléctrica o de software.

En primer lugar, en cuanto al esquema hidráulico-neumático se observa en la figura [3.2]:

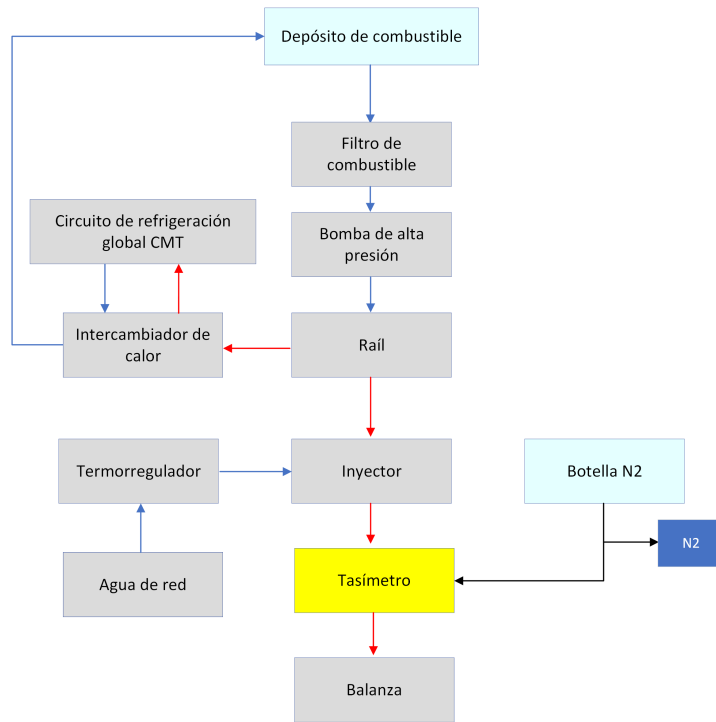


Figura 3.2. Esquema hidráulico neumático instalación de medida de tasa

Si se necesita una ampliación de la distribución eléctrica y electrónica, en la figura [3.3] se presenta el esquema donde se muestra todo el software utilizado que será explicado a lo largo del apartado [3.2]:

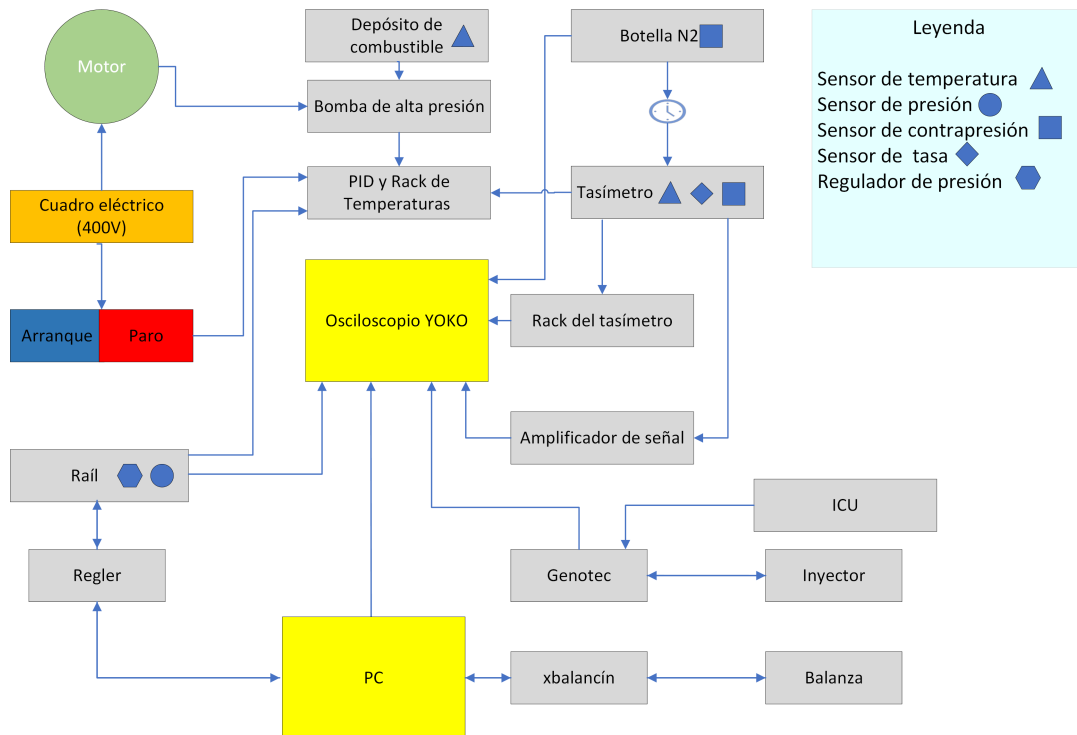


Figura 3.3. Esquema eléctrico instalación de medida de tasa

Por último, en la figura [3.4] se expone una representación en plano 2D como resumen de la instalación y de su funcionamiento:

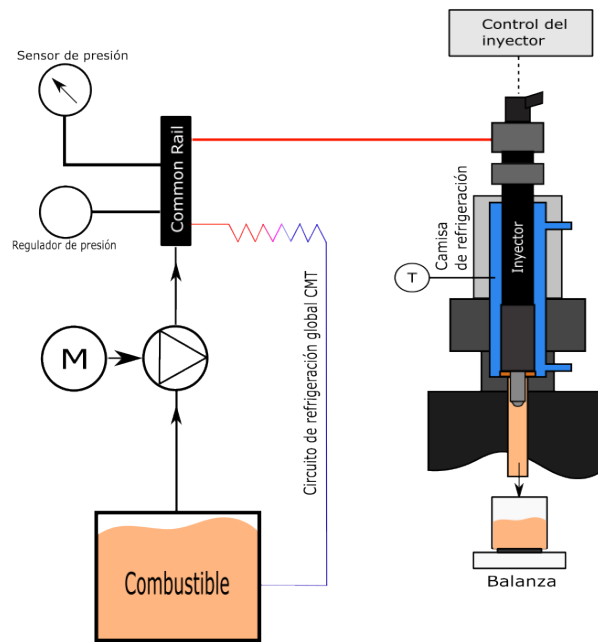


Figura 3.4. Representación 2D de la instalación medida de tasa instituto CMT

A modo ilustrativo, en la figura [3.5] se muestra una fotografía de la instalación durante los experimentos.



Figura 3.5. Instalación medida de tasa instituto CMT

3.1.2. Maqueta de cantidad de movimiento

La maqueta de CdM elegida para este proyecto se puede observar en la figura [3.6], cuyos planos 2D son expuestos a continuación, en la figura [3.7]. Como se puede observar, la maqueta disponible en el instituto CMT es de forma cilíndrica, esta forma es común en este tipo de maquetas con el fin de facilitar la incorporación de algunos elementos y facilitar consigo su rotación. De la misma manera, también se utiliza ya que el mecanizado y la construcción es más fácil y porque es más robusta para soportar los esfuerzos mecánicos.

En la instalación, el captador se encuentra posicionado justamente debajo del inyector (véase figura [3.7]), tratando de conseguir de esta manera que el combustible incida de la manera más centrada posible.

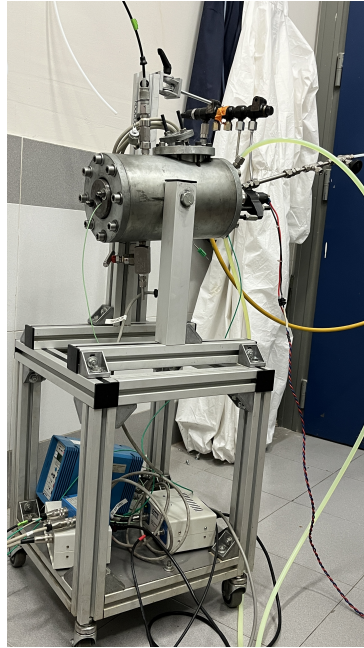


Figura 3.6. Instalación medida de cantidad de movimiento instituto CMT

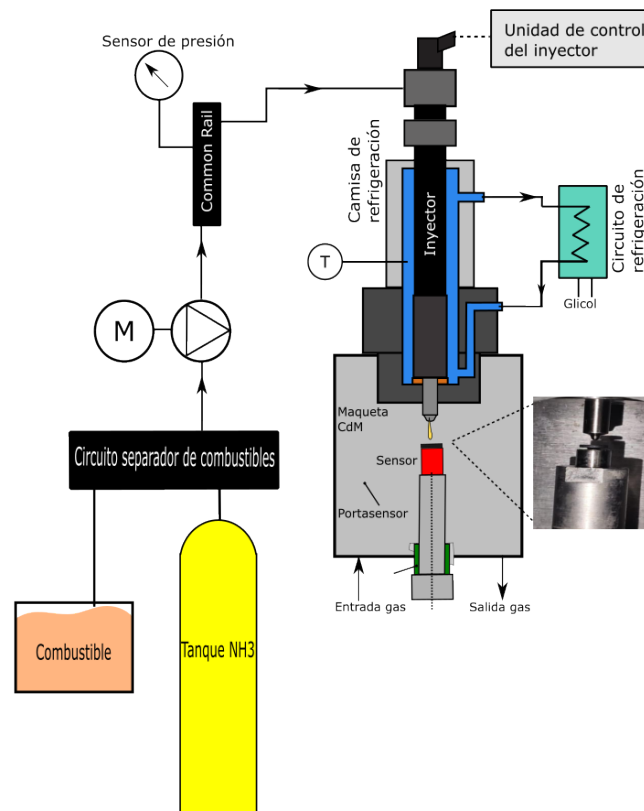


Figura 3.7. Representación 2D maqueta de cantidad de movimiento

Para la descripción de la maqueta de cantidad de movimiento cuyo principio de medida ha sido explicado en el apartado [2.5.2], se desglosará en sus esquemas eléctricos (véase figura [3.9]) e hidráulico-neumáticos (véase figura [3.8]).

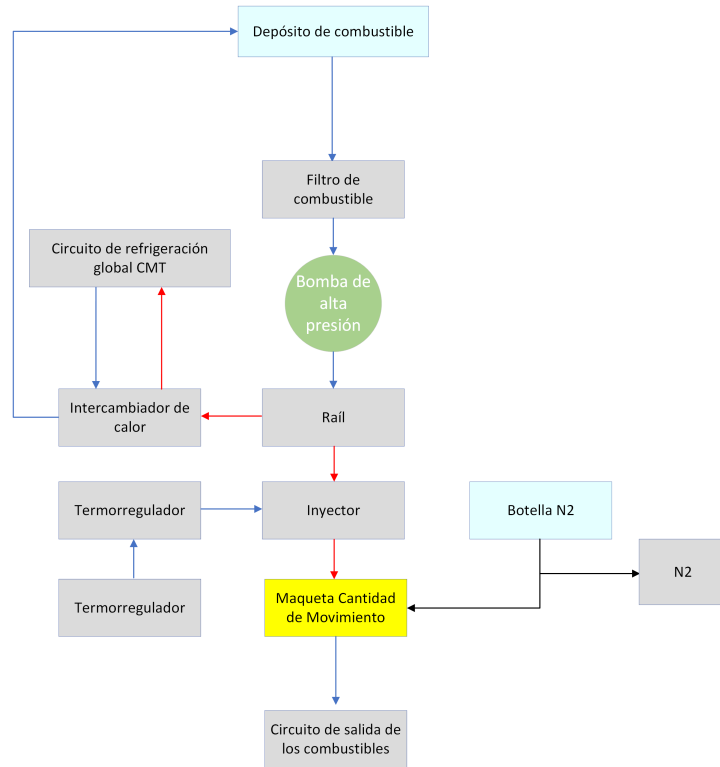


Figura 3.8. Esquema hidráulico neumático instalación de medida de CdM

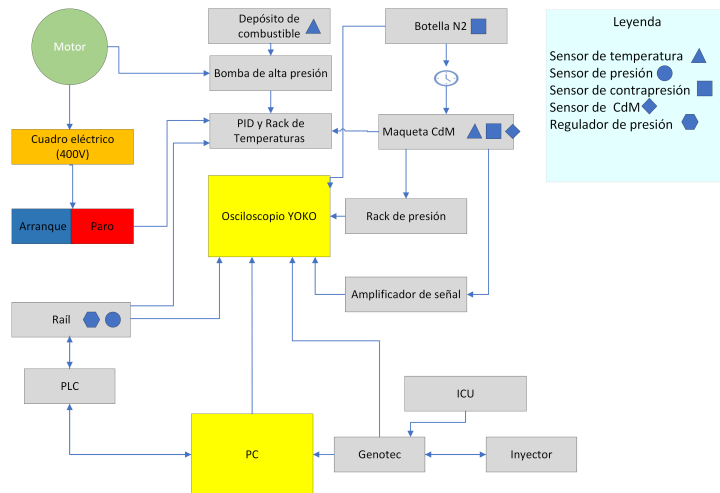


Figura 3.9. Esquema eléctrico instalación de medida de tasa

3.1.3. Motor eléctrico

El motor eléctrico debe ser capaz de alimentar a la bomba en todos los casos, es decir, su potencia nominal ha de ser mayor que la potencia que necesite la bomba en su máxima

capacidad de trabajo, que es lo mismo que a la máxima presión de inyección, en este proyecto la máxima presión de inyección es de 800 [bar].

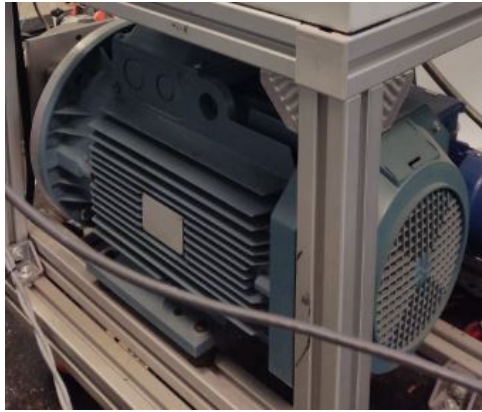


Figura 3.10. Motor eléctrico

Cabe destacar que en la instalación de cantidad de movimiento se utiliza una bomba cuyo funcionamiento tiene su base en el pistón lineal, es decir, no es una bomba centrífuga ni de pistones radiales como la de tasa, la bomba presente en la maqueta de CdM puede llegar hasta 5000 [bar], por lo que se encontraron problemas para regular la presión cuando se quería trabajar en el límite inferior de operación (400 [bar]), como se verá más adelante.

3.1.4. Bomba

La función principal de la bomba consiste en subir la presión del fluido hasta la presión requerida. La elección de esta bomba viene determinada por los requerimientos del proyecto, el motor eléctrico [3.1.3] y la presión máxima de inyección.

Esta presión es controlada mediante el regulador de presión del raíl, por lo que para comprobar la presión máxima de inyección, se cierran todas las salidas del raíl y se hace expulsar todo el combustible por el retorno, garantizando de esta manera si el sistema puede alcanzar la presión requerida.

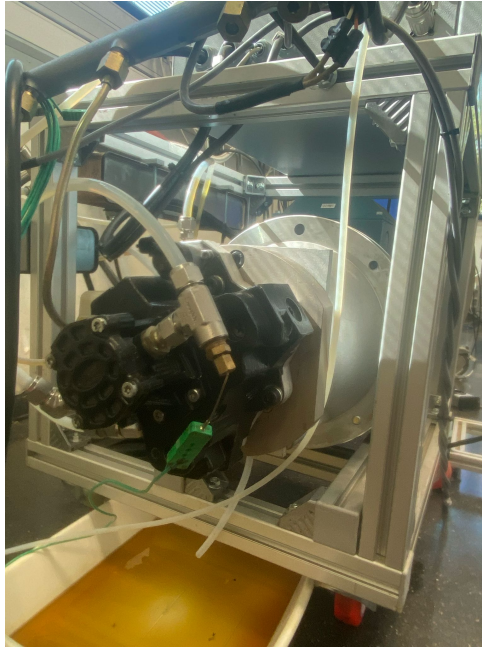


Figura 3.11. Bomba de alta presión de la instalación de tasa

3.1.5. Raíl

El raíl utilizado a lo largo de este proyecto, es un raíl de 4 salidas para inyectores, sin embargo, solo se empleará uno de ellos, ya que tanto en medida de tasa como en cantidad de movimiento solo se trabaja con un inyector simultáneamente.

El raíl empleado es capaz de soportar presiones de inyección de hasta 3000 [bar]. Este raíl está compuesto por un regulador de presión y por un sensor de presión que se conecta a una de las salidas del mismo, siendo las otras dos cerradas con tapones.

El raíl también posee la entrada del combustible y la salida del retorno de combustible.

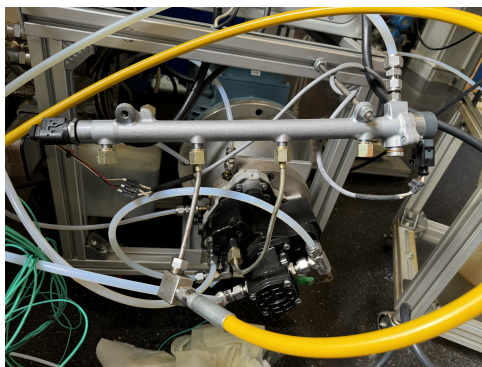


Figura 3.12. Raíl

3.1.6. Inyectores

Este elemento se encarga de inyectar el combustible en el tasímetro o en la maqueta de CdM, siendo el último elemento en la línea de alta presión. Específicamente se usarán inyectores activados con válvulas solenoides y con toberas mono-orificio (un sólo orificio), con geometría convergente para evitar la aparición de la cavitación.

Este elemento es montado sobre el porta-inyector, que se puede observar en la figura [3.13] que junto a la garra, consiguen una fijación extrema para el inyector.



Figura 3.13. Portainyector

Esta investigación sobre el amoníaco como sistema propulsivo sostenible estaba inicialmente pensada para desarrollarse con cuatro inyectores, como se explicará en el apartado [4.1], dos de ellos con diámetro de 250 [μm] y otros dos con 300 [μm]. Sin embargo, el inyector 250-1 debió ser desmontado, para evaluar el deterioro sufrido en proyectos previos donde se utilizó para inyectar amoníaco, y finalmente no fue posible realizar experimentos con él.

Por otro lado, el proyecto se desarrollará usando los tres inyectores restantes. En la figura [3.14] se muestra uno de los inyectores utilizados.



Figura 3.14. Inyector 250-2

3.1.7. Filtro y depósito de combustible

El depósito de combustible es el recipiente que contiene el fluido de trabajo, además, debe tener un orificio lo suficientemente grande con el fin de poder extraer el combustible, introducir el conducto del flujo de retorno y también poder introducir un sensor de temperatura.



Figura 3.15. Depósito de diésel

A la salida del combustible, se encuentra el filtro de combustible que se ve en la figura [3.16], debido a que tras volver a introducir el combustible en el depósito, a pesar de que no se realice combustión puede estar contaminado, siendo este elemento el encargado de filtrar esta contaminación.



Figura 3.16. Filtro de combustible

3.1.8. Balanza

Como bien se ha explicado en el apartado [2.5.1] se emplea esta balanza de alta precisión en las medidas de tasa, sobre esta se deposita un recipiente que almacenará el combustible tras la inyección. Se necesita esta balanza de alta precisión conectada al programa *xbalancin* con el fin de recoger el dato progresivo de combustible inyectado y poder adelantarse al posible vaciamiento del depósito de combustible visto en el apartado [3.1.7].

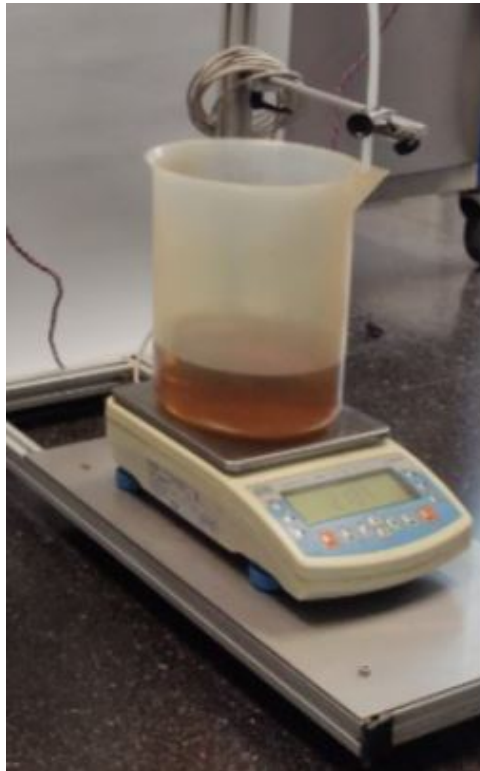


Figura 3.17. Balanza

3.1.9. Depósito amoníaco

En lo que respecta al depósito de amoníaco que se utiliza en la maqueta de CdM y con base en la tabla [2.4.2] en la que se detalla que la temperatura de ebullición del amoníaco es -33°C . A raíz de este dato, y como en el depósito se ha de conservar el amoníaco en estado líquido se necesita presurizar dicho recipiente, por lo que este recipiente está presurizado a 9 [bar] ya que no sería viable mantener el depósito a la temperatura de -33°C para mantenerlo en estado líquido, esto se consigue a través de la presión.

Como se ve en la figura [3.18], este tanque está recubierto con una mantilla eléctrica, esto podría parecer contradictorio, pues al interesar que el amoníaco se conserve en estado líquido y calentar podría pasar a estado gaseoso, sin embargo, esto no ocurre. Esta mantilla eléctrica es utilizada con el fin de mantener el gas presurizado.



Figura 3.18. Depósito NH_3

3.1.10. Botella de nitrógeno

Estas botellas almacenan el N_2 , que es el compuesto encargado de simular la presión en las maquetas.

Las botellas que se disponen en el CMT están presurizadas a 200 [bar], y con el ajuste del manorreductor que se verá en el apartado [3.1.11] se consigue regular la contrapresión deseada.



Figura 3.19. Depósito N_2

3.1.11. Manorreductor

Este instrumento consta de dos manómetros que indican la presión en el interior de la botella de N_2 y la existente en la maqueta. Se debe tener en cuenta que los manorreductores usados en ambas instalaciones son diferentes, ya que en la instalación de tasa la contrapresión es directamente descargado por el manorreductor y en la maqueta de CdM existe una válvula adicional para ello.

Este instrumento también es utilizado en la instalación de medida de cantidad de movimiento con aire comprimido. en este caso, con el fin de presurizar la salida del combustible de la maqueta. El amoníaco, como ya se ha citado en el apartado [2.4.3], tiene un punto de ebullición de 239.87 [K], equiparables a -33.13 [$^{\circ}\text{C}$], por este hecho se encuentra presurizado a temperatura ambiente. Con el fin de garantizar una recirculación correcta en el escape de la maqueta se ha de seguir conservando estas propiedades, por lo que se utiliza este manorreductor con el fin de inyectar aire comprimido a la presión de salida y garantizar que el NH_3 permanece en estado líquido.



Figura 3.20. Manorreductor aire comprimido maqueta Cdm

3.1.12. Sistema de refrigeración global CMT

Este sistema de refrigeración global, que ya ha sido representado esquemáticamente, es el encargado de que las instalaciones de tasa y de cantidad de movimiento no alcancen temperaturas extremas que puedan perjudicar la salud de los materiales o provocar un posible accidente. Este sistema de refrigeración tiene diversos puntos de conexión en los que se trata de mantener las instalaciones a 16°C.



Figura 3.21. Enfriadora instituto CMT

3.1.13. Circuitos combustible diésel-amoniaco

Debido a que en la maqueta de Cdm se ha de trabajar con dos combustibles (amoníaco y diésel), se dispone de estos conductos con el fin de separar y aislar ambos combustibles. Estos conductos funcionan de la siguiente manera, disponen de válvulas reguladoras para cerrar el paso de un combustible hacia el raíl cuando acceda el otro, además, como se explicará en el pliego de condiciones [2] tras terminar de medir con amoniaco, con el fin de liberar toda la sala de la presencia de este compuesto, los conductos son recirculados de nuevo con diésel, cerrando la válvula de NH_3 y abriendo la del diésel, de manera que tanto los conductos como la sala estén libres de peligros contaminantes y corrosivos.

En la figura [3.22] se pueden apreciar los conductos de la sala mientras que en la figura [3.23] se representa de manera esquemática con la presencia de las válvulas.

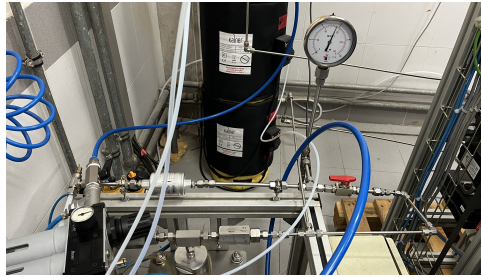


Figura 3.22. Circuitos de separación de combustible CdM

En la figura [3.22] se observa como la instalación está preparada para la medición con el combustible diésel, pues se observa como la manibela 1 está abierta.

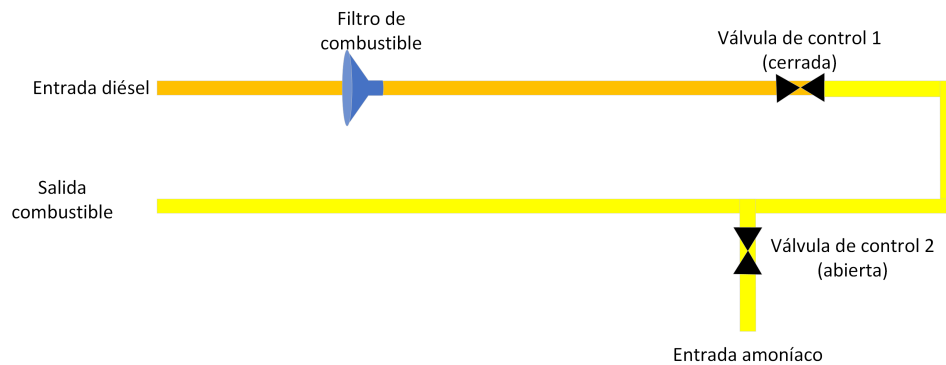


Figura 3.23. Esquema circuitos de separación de combustible CdM

Por otro lado, en la figura [3.23] se esquematiza la instalación para la medida con NH_3 pues se observa como la válvula 1 se encuentra cerrada mientras la entrada de amoníaco se encuentra abierta.

3.1.14. Amplificador de la señal de presión en la maqueta de cantidad de movimiento

Corresponde a un paso intermedio entre la señal medida por el sensor de presión que se encuentra en la maqueta de CdM y el osciloscopio, este aparato procesa y amplifica la señal con el fin de obtener una señal correcta y precisa.

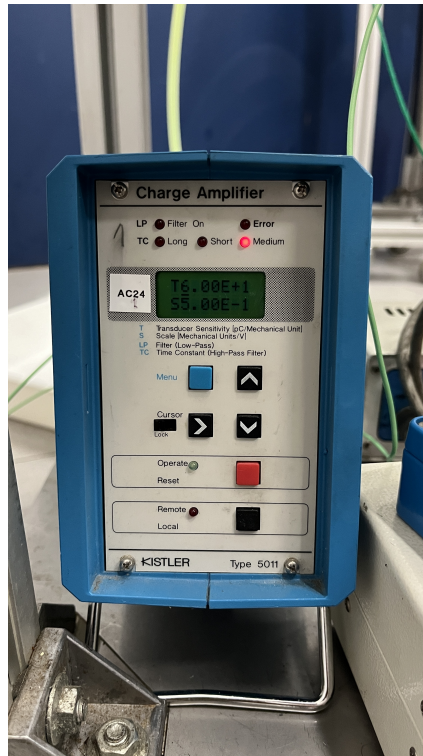


Figura 3.24. Amplificador de señal de cantidad de movimiento

3.2. Metodología de adquisición de datos y postprocesado

A lo largo del presente apartado se expondrá todo el sistema de postprocesado y recogida de información que es utilizado con el fin de analizar los resultados.

3.2.1. Inyector Control Unit (ICU)

Este aparato es el encargado de transmitir los pulsos al genotec. Es decir, según la frecuencia que se imponga en el ordenador, este apartado transmitirá los pulsos cada periodo correspondiente a la frecuencia.



Figura 3.25. Unidad de control del inyector

3.2.2. Regler

El software alemán *Regler* es el encargado de imponer la presión de inyección de la maqueta, como se ve en la figura [3.26] dispone de un modo manual y un modo automático para la consecución de la presión deseada. En este proyecto, se ajustarán las presiones de modo manual aumentando progresivamente la presión, como se ha resaltado en la figura.

Además, se ha de tener en cuenta el peligro de aumentar la presión de inyección, por lo que se ha de hacer progresivamente esperando que se estabilice con el regulador en cada punto con el fin de no saturar la señal ni el regulador de presión. En el caso de fin de ensayo, no sería necesario ajustar la presión progresivamente, pues disminuir la presión no es peligroso para la instalación, por lo que se podría imponer 0 [bar] de presión y presionar el boton *Setzen*.

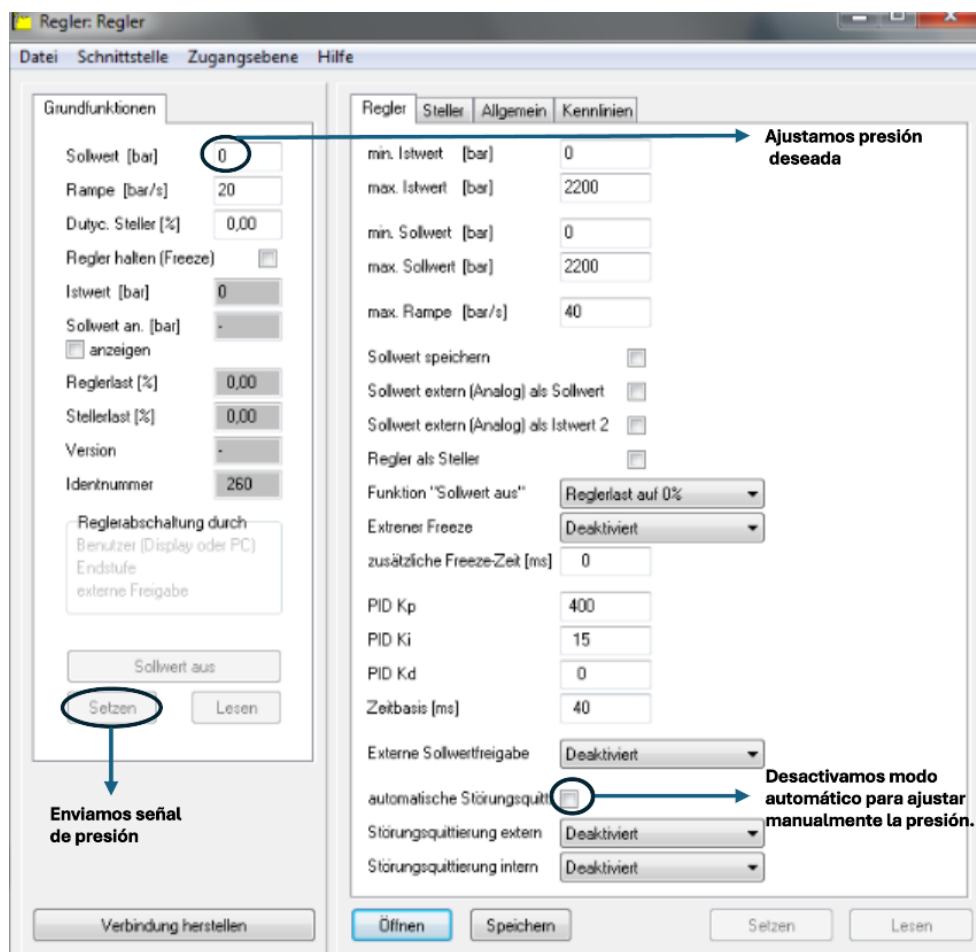


Figura 3.26. Regler

3.2.3. Genotec y Magnetoinyector

Se ha decidido agrupar este software y esta herramienta para entender mejor su explicación, el software *Magnetoinyector* es el encargado de transmitir a la herramienta *Genotec* el voltaje e intensidad con los que ha de trabajar el inyector como se ve en la

figura [3.28]. El genotec simplemente alimenta al inyector para el levantamiento de la aguja del mismo y el comienzo de la inyección. Asimismo, se recuerda que el periodo de inyección viene determinado por la frecuencia impuesta por la ICU. La herramienta *Genotec* se puede observar en la figura [3.27].



Figura 3.27. Genotec

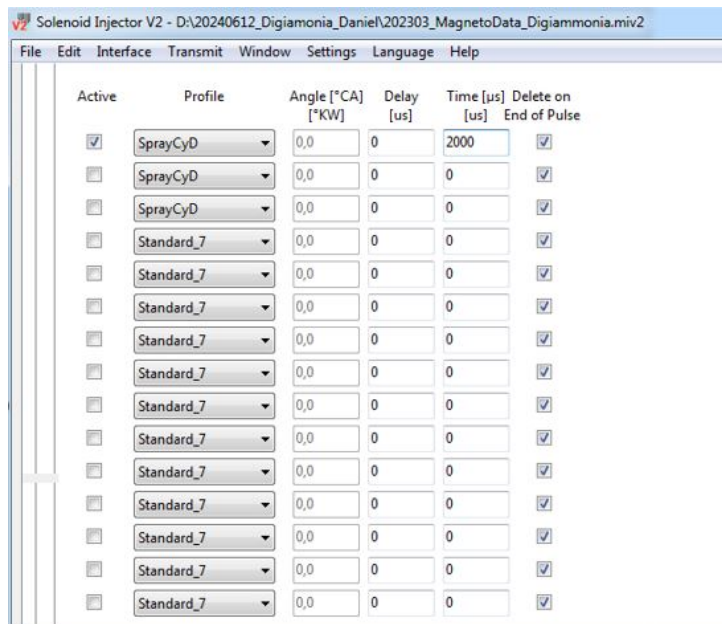
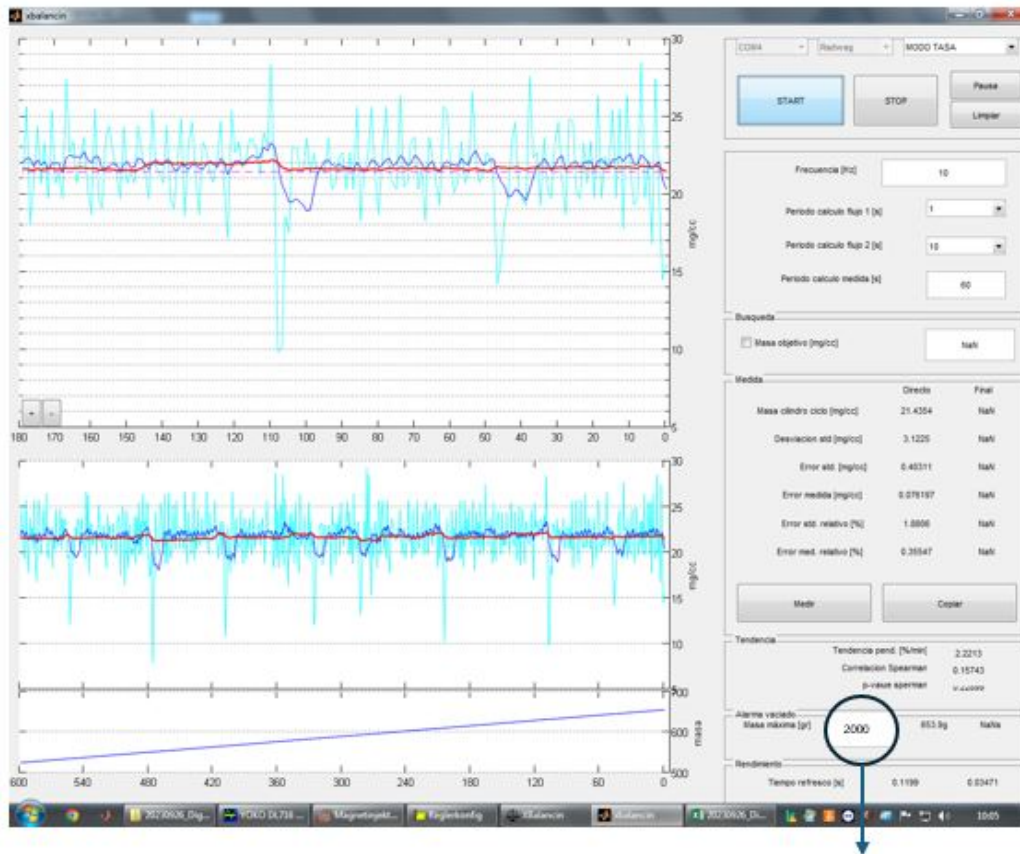


Figura 3.28. Software *Magnetoinjector*

3.2.4. Xbalancin

El xbalancin es un programa desarrollado por el CMT en matlab que se encarga de registrar las variaciones de masa en la balanza de alta precisión [3.1.8]. Como corresponde, este software es solamente utilizado para la instalación de tasa ya que en la instalación de cantidad de movimiento no se necesita medir la masa de combustible inyectado.

Este programa muestra la cantidad de masa inyectada en unidades [mg/cc], es decir, miligramos por cilindro y ciclo. De esta manera, este software permite establecer una alarma con el fin de prevenir cuando el depósito [3.1.7] se va a quedar sin combustible.



Quando lleguemos a 2000 [g] de combustible nos lanzará un aviso para cambiar el depósito

Figura 3.29. Software *xbalancin*

3.2.5. Hojas de cálculo

El programa utilizado es *Excel*, programa del paquete *Office*. En este se recogen los principales datos proporcionados en cada ensayo, es decir, los datos calculados por el software *xbalancin* y también las temperaturas del tasímetro, depósito y retorno.

Para cada punto de ensayo se realizan dos repeticiones y se calcula un porcentaje de error entre ambas (en el caso de las medidas de tasa), si dicho porcentaje es inferior al 5% se toman las medidas como válidas, sino, se deben repetir.

En la figura [3.30] se expone un ejemplo de la recogida de medidas de los ensayos de tasa, mientras que en la figura [3.31] se muestra la hoja excel en la que se realiza la recogida de información de los ensayos de la maqueta de cantidad de movimiento.

A	P	Q
Nombre medida	Digiammonia_p08_P0800_CP60_ET2000_rep1	Digiammonia_p08_P0800_CP60_ET2000_rep2
Proyecto	Digiammonia	Digiammonia
Tobera	250um	250um
Combustible	Diesel	Diesel
Punto	8	8
Repetición	1	2
Numero de pulsos	1	1
DT1 (Yoko)	500	500
ET1	2000	2000
DT2	0	0
ET2	0	0
Presion inyeccion objetivo [bar]	800	800
Contrapresion objetivo [bar]	60	60
Contrapresion medida [bar]	60.4	60.5
T deposito [°C]	36	36
T EVI [°C]	42	42
T retorno [°C]	26	26
Frecuencia [Hz]	10.00	10.00
Periodo calculo [s]	60.00	60.00
Gasto Masico [g/s]	0.37	0.36
Desviación std. [mg/cc]	3.40	7.01
Error Estandar [%]	1.18	2.52
Error Relativo [%]	0.23	1.00
Masa medida [mg/cc]	37.37	35.93
Error entre Repeticiones		-3.995781026

Figura 3.30. Muestra software *Excel* en los ensayos de tasa

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Nombre Medida	Proyecto	Tobera	Punto	Orificio	Repe	Pinyobj	CPobj	CP	Tmaq	Teb	npulsos	DT1	ET1	Combust	Gas
2	Digiammonia_300_p01_P0400_CP40_ET2000_ori1_r1	Digiammonia	300	1	1	1	400	40				1	500	2000	Diesel	N2
3	Digiammonia_300_p01_P0400_CP40_ET2000_ori1_r2	Digiammonia	300	1	1	2	400	40				1	500	2000	Diesel	N2
4	Digiammonia_300_p02_P0600_CP40_ET2000_ori1_r1	Digiammonia	300	2	1	1	600	40				1	500	2000	Diesel	N2
5	Digiammonia_300_p02_P0600_CP40_ET2000_ori1_r2	Digiammonia	300	2	1	2	600	40				1	500	2000	Diesel	N2
6	Digiammonia_300_p03_P0800_CP40_ET2000_ori1_r1	Digiammonia	300	3	1	1	800	40				1	500	2000	Diesel	N2
7	Digiammonia_300_p03_P0800_CP40_ET2000_ori1_r2	Digiammonia	300	3	1	2	800	40				1	500	2000	Diesel	N2
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																
15																
16																

Figura 3.31. Muestra software *Excel* en los ensayos de CdM

3.2.6. Osciloscopio Yokogawa y software YOKO

Al igual que se ha hecho un conjunto para el *Genotec* y *Magneto-Inyector* se procede a hacer lo mismo con el osciloscopio y su correspondiente software con el fin de aclarar y visualizar mejor los conceptos.

El osciloscopio que se puede observar en la figura [3.32] es el encargado de recibir todas las señales de ambos laboratorios, sin embargo, con el fin de obtener los resultados de manera digital y poder recogerlos rápidamente en la computadora se utiliza el software YOKO, que en la instalación de tasa es el encargado de imponer el número de repeticiones que se van a realizar (50 en este proyecto). Por ello, es en este software en el que se graban y recogen las 50 repeticiones, como se ve en la figura [3.32].

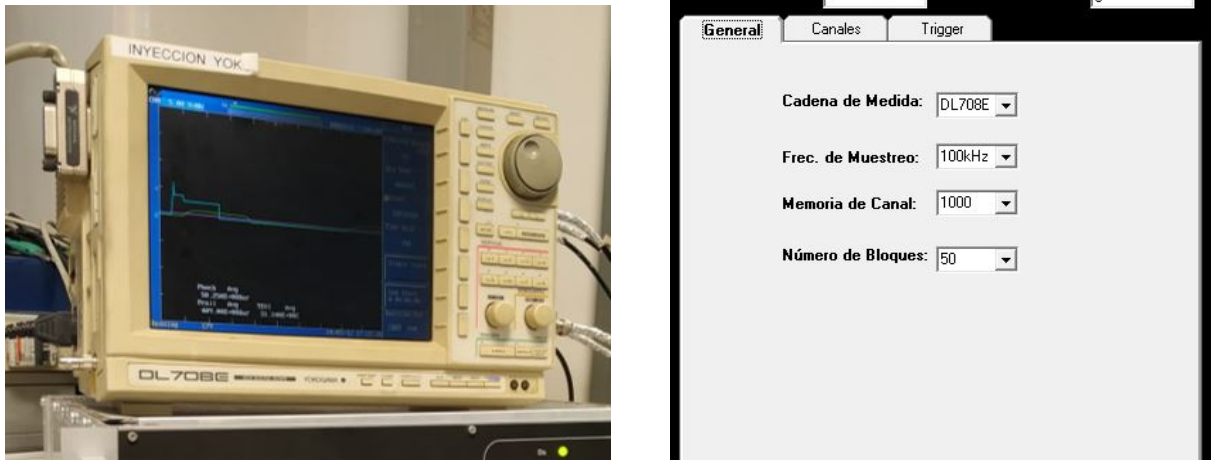


Figura 3.32. Software y osciloscopio YOKO

3.2.7. Xtasutiles

Este software que también ha sido desarrollado en el instituto de investigación CMT y corresponde al primer paso de postprocesado, ya que se encarga de organizar cada una de las 50 repeticiones y poder mostrar una visualización ya corregida y previa a través de la cuál ya se podrían analizar los resultados. Este software posee la interfaz que se observa en la figura [3.33] y proporciona imágenes de la señal como la que se puede ver en la figura [3.34].

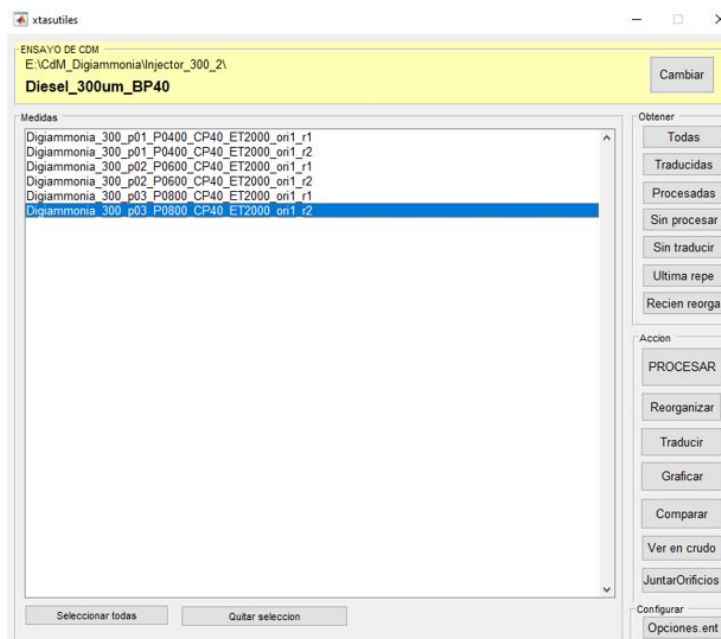


Figura 3.33. Software *xtasutiles*

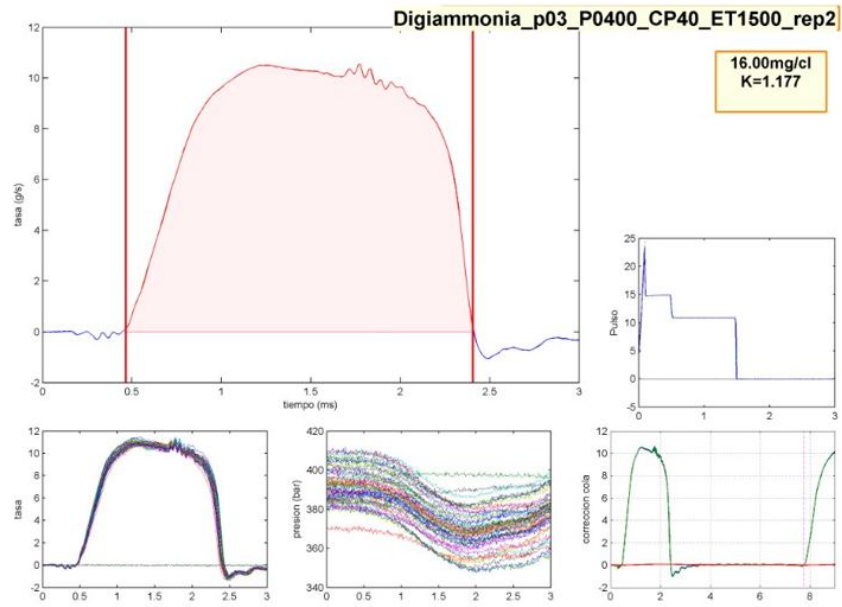


Figura 3.34. Ejemplo resultados software *xtasutiles*

Capítulo 4

Análisis experimental y de resultados

4.1. Plan de ensayos del proyecto

Una vez definidos los conceptos teóricos y el sistema de medida de ambas instalaciones se desarrollará el plan de ensayos y sus resultados y correspondiente análisis.

En primer lugar, se ha de destacar que no se han podido realizar directamente las medidas de tasa con NH_3 ya que el tasímetro no podría soportar esta sustancia tan corrosiva. Sin embargo, esta magnitud se determinará a partir de la cantidad de movimiento [4.2.2], utilizando la metodología propuesta en estudios previos para diésel.

Inicialmente este proyecto financiado por fondos europeos estaba previsto para ser realizado con cuatro inyectores, dos de ellos con una tobera de $250 \mu m$ y otros dos de ellos con otra tobera de $300 \mu m$. Esto no fue posible debido a que uno de los inyectores que de la tobera de $250 \mu m$ ya había sido utilizado con amoníaco, y había sido corroído e incapacitado.

A lo largo de los ensayos se obtendrán los resultados para los tres inyectores y se tratará de obtener las medidas de tasa y cantidad de movimiento, así como la influencia de la presión de inyección, de la contrapresión del diámetro de la tobera en dichas medidas y del tiempo de energetización. También se calcularán los diversos coeficientes de descarga y se hablará de la influencia del uso del amoníaco.

En lo que respecta la plan de ensayos, como ya se ha comentado anteriormente, en la instalación de tasa no se puede medir con amoníaco, por lo que quedaría el siguiente plan de ensayo para los tres inyectores (no se ha repetido la tabla para cada uno de ellos con el fin de simplificar la tabla) y sus correspondientes presiones de inyección, contrapresión y tiempos de energetización.

Inyector	Presión de inyección [bar]	Contrapresión [bar]	Tiempo de energización [μ s]
Inyector 250-2	400	40	500
			1000
			2000
		50	500
			1000
			2000
	60	500	
		1000	
		2000	
Inyector 300-1	600	40	500
			1000
			2000
		50	500
			1000
			2000
	60	500	
		1000	
		2000	
Inyector 300-2	800	40	500
			1000
			2000
		50	500
			1000
			2000
	60	500	
		1000	
		2000	

Figura 4.1. Plan de ensayos tasa

Para las medidas de cantidad de movimiento no es necesario aplicar distintos tiempos de energización. Además, el inyector 300-1 fue sometido a estudio por microscopia electrónica debido a la incoherencia con los resultados del inyector 300-2, por lo que no se trabajará con el. Por último, el sensor de presión utilizado en cantidad de movimiento para la presión de cámara tiene un rango más acotado, y solo se puede realizar la contrapresión de 40 [bar] hasta la actualidad, las medidas para el resto de contrapresiones se realizarán en el futuro. Por lo que el plan de ensayos para las medidas de cantidad de movimiento es el siguiente:

Combustible	Inyector	Presión de inyección [bar]	Contrapresión [bar]	Tiempo de energización [μ s]
Diésel	Inyector 250-2	400	40	2000
		600		
		800		
	Inyector 300-2	400		
		600		
		800		
Amoníaco	Inyector 250-2	450	40	2000
		500		
		600		
		800		
	Inyector 300-2	450		
		500		
		600		
		800		

Figura 4.2. Plan de ensayos cantidad de movimiento

4.2. Caracterización del sistema con el combustible de referencia (diésel)

4.2.1. Medidas de tasa (50 reps)

Para obtener las señales de medida de tasa se realizaron un total de 50 repeticiones para cada punto de ensayo, que se pueden ver en la figura [4.3]. Para estas 50 repeticiones se realizará un promediado con el fin de obtener la cantidad de masa inyectada en función del tiempo.

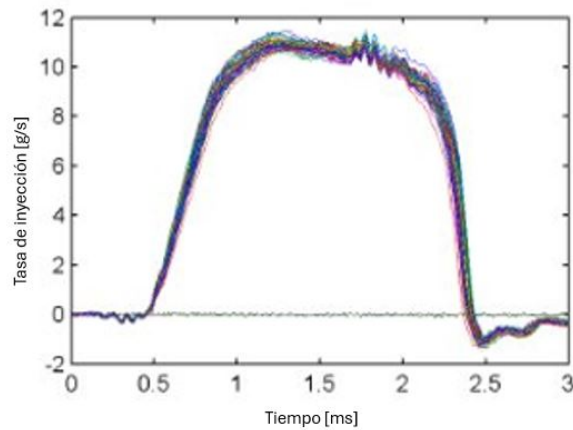


Figura 4.3. 50 repeticiones medida de tasa

Como se puede observar en la figura [4.3] existe una distorsión de la señal registrada en el cierre del inyector. Durante las primeras medidas de la campaña experimental, el equipo de generación de señal (trigger) estaba defectuoso, y no generaba los 50 pulsos de manera constante. Es por ello que ciertos pulsos de inyección no se pudieron registrar correctamente. Para subsanar este efecto y poder aprovechar correctamente la información adquirida, dichos pulsos fueron depurados durante el proceso de post-procesado. Afortunadamente, en el resto de medidas experimentales se pudo sustituir el generador de señal de trigger que fallaba por otro generador de señal adecuado.

Una vez planteada la aproximación de las 50 repeticiones, se han de hablar de dos posibles correcciones de la curva de tasa registrada, una de ellas ante una posible señal de tasa negativa tras el cierre, hecho que no tendría sentido debido a que significaría que existe un flujo de retorno tras el cierre del tasímetro y otra de ellas debido a una señal de tasa positiva mayor que cero debido a que la señal queda cargada. Esto puede deberse a dos razones, pero ambas tienen su origen en el sensor del tasímetro. Este sensor puede quedar cargado eléctricamente o porque este sensor registre cualquier variación de presión y la interprete como flujo inyectado. Estos dos tipos de comportamiento son recogidos en la gráfica [4.4].

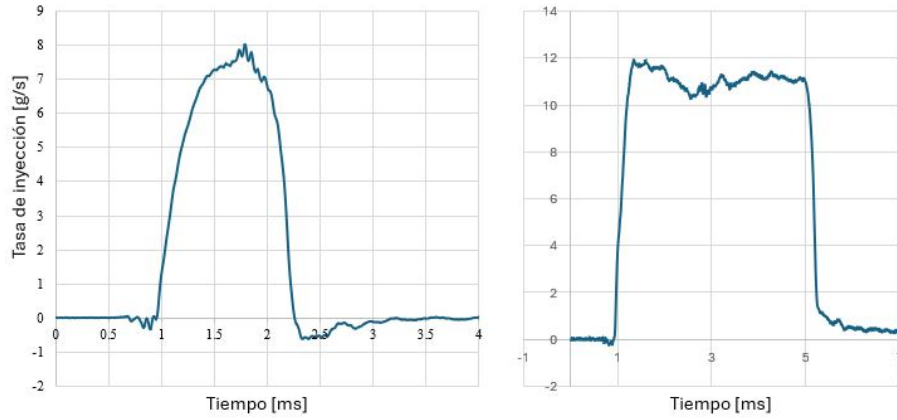


Figura 4.4. Señal de tasa negativa (a) y señal de tasa positiva (b)

Esta señal es corregida mediante un polinomio de sexto orden, como se puede observar en la figura [4.5].

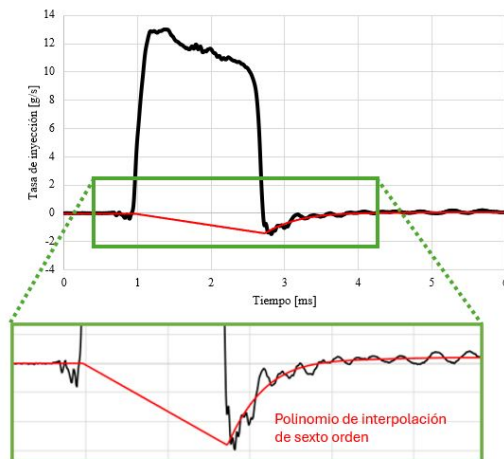


Figura 4.5. Polinomio de corrección medida de tasa

Operando matemáticamente estas señales, quedaría la siguiente señal de tasa corregida:

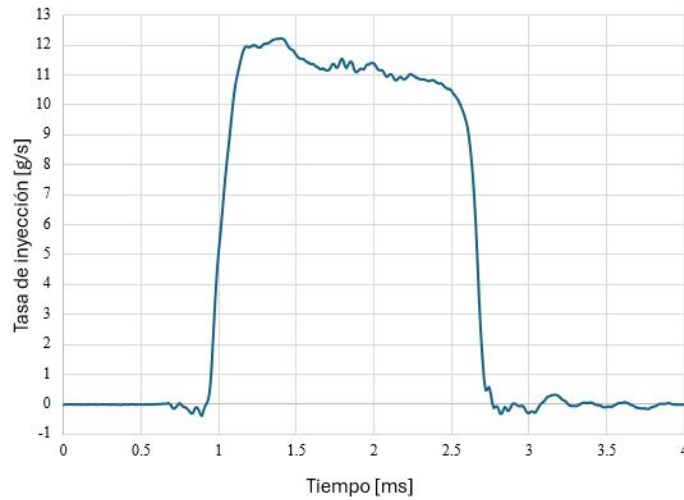


Figura 4.6. Señal corregida medida de tasa

Por último, con el fin de obtener una señal más realista y con menos ruido, se realiza el producto de la primera y segunda derivada de la señal, pudiendo obtener de esta manera los puntos de apertura y cierre del inyector. La señal final completamente corregida con los puntos de apertura y cierre del inyector se puede observar en la figura [4.7]

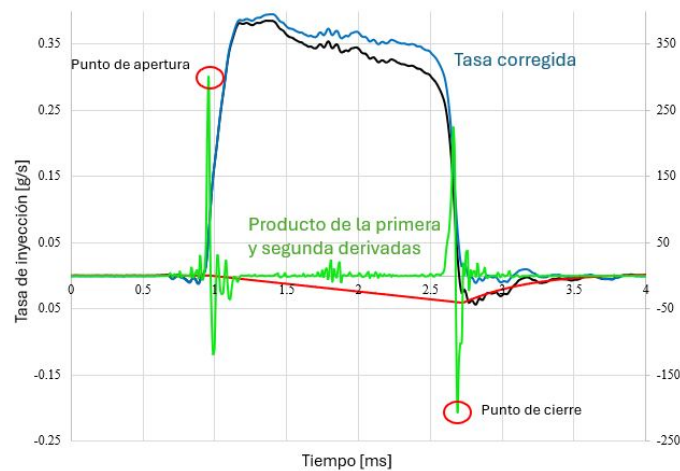


Figura 4.7. Señal final de tasa corregida

Si se representa únicamente la señal final de tasa [4.8], se puede obtener el área final de la curva mediante el cálculo de la integral [4.1] (donde a y c se corresponden con los puntos de apertura y cierre), que se corresponde con la masa medida en el software *xbalancin* explicado en el apartado [3.2.4].

$$m = \int_c^a \frac{dm}{dt} dt \quad (4.1)$$

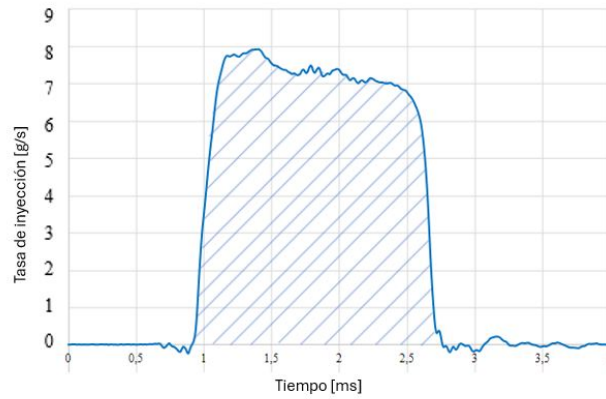


Figura 4.8. Señal final de tasa

Influencia de la presión de inyección

Escogiendo el inyector cuya tobera es de $250\ \mu\text{m}$, seleccionando una contrapresión de ensayo (40 [bar]) y eligiendo un tiempo de energetización de $2000\ \mu\text{s}$, se podrá estudiar la influencia de la presión de inyección como se representa en la figura [4.9] para las presiones de inyección de 400, 600 y 800 [bar]:

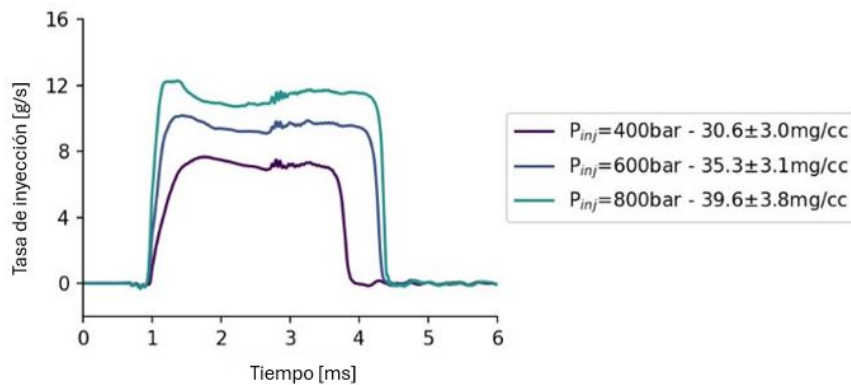


Figura 4.9. Señal de tasa para diferentes presiones de inyección

En la leyenda de la figura [4.9] se pueden observar las 3 presiones de inyección y el correspondiente error calculado por el software *xbalancin* con base de cálculo en la expresión [4.1].

Se observa que a medida que aumenta la presión de inyección crece consigo la tasa de inyección.

Por otro lado, también se observa que el tiempo de apertura decrece a medida que aumenta la presión de inyección, es decir, se vuelve más rápido. Lo contrario ocurre en

cuanto al punto de cierre, ocurre más tarde a medida que aumenta la presión de inyección. A mayores presiones de inyección, más extenso será el tiempo de inyección.

Influencia de la contrapresión

Con el fin de realizar el análisis para distintas contrapresiones se plantean en la gráfica [4.10] los resultados correspondientes al Inyector 300-2 para un tiempo de energetización de 2000 $[\mu\text{s}]$ y una presión de inyección de 400 [bar].

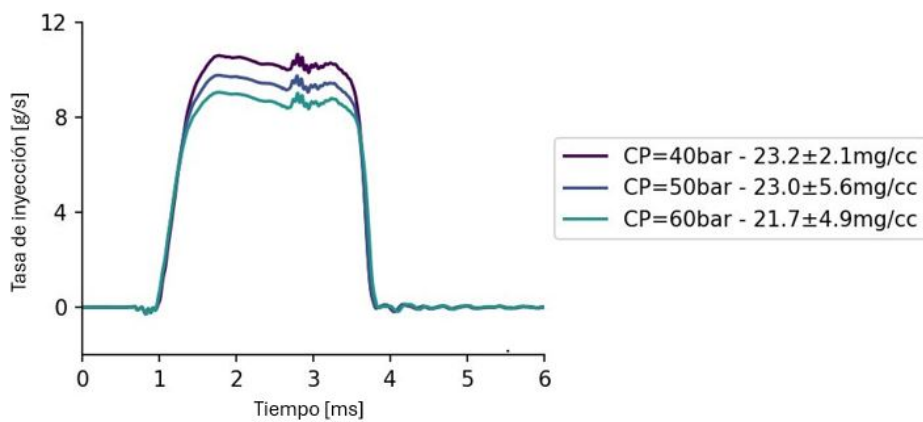


Figura 4.10. Señal de tasa para diferentes contrapresiones

A medida que aumenta la contrapresión, el salto de presiones disminuye, por lo que se observa una tendencia contraria a la presión de inyección, es decir, a medida que aumenta la contrapresión, disminuye la cantidad de combustible inyectada. Sin embargo, estas variaciones de contrapresión no tienen efectos significativos sobre los puntos de apertura y cierre del inyector.

Influencia del tiempo de energetización

El tiempo de energetización es el tiempo que dura la válvula solenoide activada o excitada, término que comanda la duración de la inyección.

En las medidas de tasa, se ha estudiado cada punto de ensayo para 5 tiempos de energetización: 500, 1000, 1500, 2000 y 3000 $[\mu\text{s}]$. Los valores obtenidos en el inyector 250-2 para la contrapresión de 60 [bar] y una presión de inyección de 400 [bar] se resumen en la siguiente gráfica.

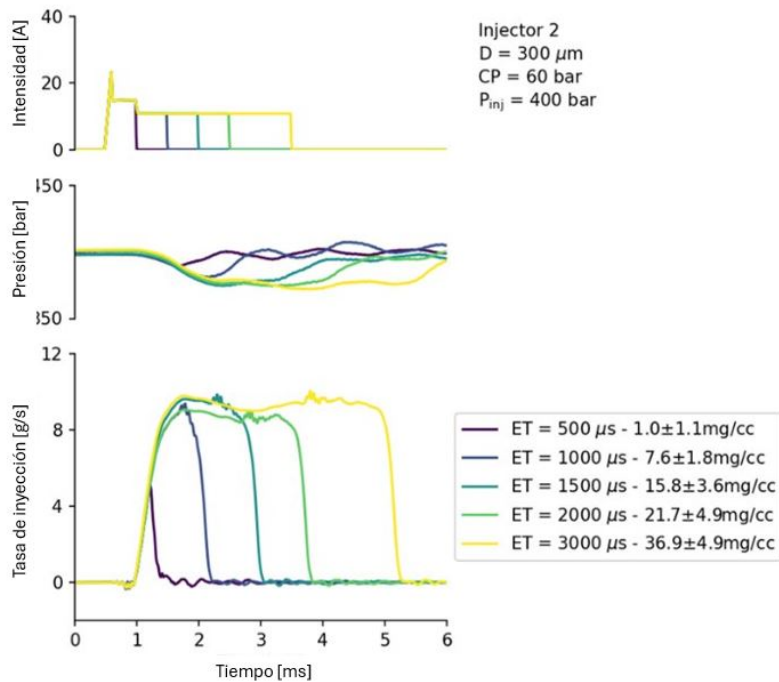


Figura 4.11. Señal de tasa para diferentes tiempos de energetización

Si se requiere un análisis exhaustivo de la influencia del tiempo de energetización, se ha de decir que los tiempos de energetización de 500 y 1000 [μs] son típicos de inyecciones piloto, y a partir de aquí, los siguientes tiempos de energetización ya consiguen fases estabilizadas de la inyección, este hecho es más característico de inyecciones principales y permiten hacer análisis de tasas promedio y coeficientes de descarga, por lo que a medida que aumenta el tiempo de energetización, aumenta la cantidad de masa inyectada y el tiempo de inyección estable.

Si se requiere un análisis exhaustivo de la zona estacionaria de la inyección no se podría trabajar con el tiempo de energetización de 500 [μs] pues no llega a alcanzarlo. Del mismo modo, el tiempo de energetización de 1000 [μs] es una inyección relativamente corta y el estacionario del flujo másico se consigue en un intervalo de tiempo muy pequeño. Por ello, el análisis de la zona estacionaria se realiza para las inyecciones más largas, con tiempos de energetización mayores a 1500 [μs].

Diámetro de la tobera

En cuanto al diámetro de la tobera, como ya se ha explicado en el plan de ensayos del proyecto [4.1], se ha trabajado con tres inyectores. El Inyector 250-2 posee un diámetro de 250 [μm], mientras que el Inyector 300-1 y el Inyector 300-2 poseen un diámetro de 300 [μm], por lo que cabría esperar resultados prácticamente idénticos.

Para analizar el diámetro de la tobera en las medidas de tasa se ha seleccionado una presión de inyección de 800 [bar], una contrapresión de 50 [bar] y un tiempo de energetización de 2000 [μs], como se puede ver en la figura [4.12].

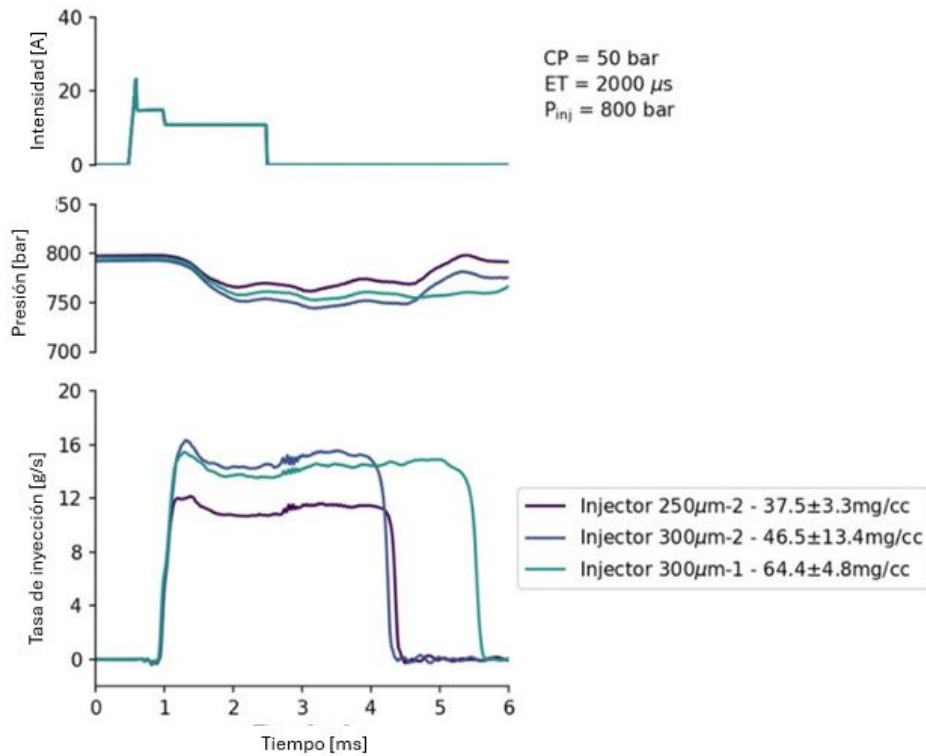


Figura 4.12. Señal de tasa para diferentes diámetros de tobera

Primero, se observa que a mayor diámetro, mayor área de paso disponible y por tanto se registra un mayor gasto másico. Por otro lado, en la figura [4.12] se observa que la duración de la inyección en uno de los inyectores es mucho mayor que en las otras dos unidades caracterizadas. Siendo el inyector 300-1 y el inyector 300-2 el mismo modelo y teniendo el mismo diámetro de tobera cabría esperar resultados análogos.

Este hecho tiene su base en que el inyector 300-1 ha sido usado en otros proyectos con amoníaco, lo que ha podido dañar el orificio de la tobera, por lo que se deberá realizar una investigación independiente a este inyector, con el objetivo de concretar los resultados del trabajo.

El deterioro del inyector a causa del NH_3 también se aprecia en una disminución de la tasa inyectada en la fase estacionaria de la curva, lo que es un síntoma de obstrucción de algún conducto o del orificio del inyector. Para verificar esta hipótesis, y entender si hay desperfectos, se analizará el interior de la tobera con rayos X, del servicio de microscopía de la UPV.

Por último, se debe mencionar que a mayor diámetro de tobera se presentará una mayor tasa de inyección.

Coefficiente de descarga

El coeficiente de descarga puede ser definido como la relación entre el caudal real y el caudal máximo teórico, por lo que sus valores estarán acotados entre 0 y 1.

Este parámetro suele ir analizado en función del número de Reynolds debido a que el caudal másico depende de la velocidad efectiva.

Para realizar estos ensayos se estudiará el inyector 250-2 con una contrapresión de 40 [bar]. Siendo el eje X correspondiente al número de Reynolds, dependiente linealmente de la velocidad del flujo y de la raíz de la diferencia de presiones.

Para realizar los cálculos del coeficiente de descarga en función del número de Reynolds se necesitan hacer los siguientes cálculos. Se necesita la velocidad teórica calculada según la expresión [4.2]. Una vez obtenida la velocidad teórica, se puede obtener el número de Reynolds a partir de la diferencia de la presión de inyección y de la contrapresión al inicio de la inyección, el diámetro de la tobera y la viscosidad y la densidad a la salida de la tobera, como se observa en la ecuación [4.3]. Por último, el coeficiente de descarga se obtiene a partir de la relación [4.4], en la que el caudal \dot{m}_f se corresponde con el caudal medio en estado estacionario, en el caso en el que la presión de inyección sea de 400 [bar], mientras que en el caso de 600 y 800 [bar] corresponde al nivel constante de inyección correspondiente desde el final del ruido de la señal hasta el fin del nivel constante. Se observan los intervalos de medida en la figura [4.13]. Por último, cabe destacar que el diámetro escogido en este inyector para el cálculo del coeficiente de descarga no ha sido 250 [μm], ya que tras el análisis en rayos X y el posterior posttratamiento en el software *Dragonfly* se observa que la geometría real de la tobera presenta una obstrucción, reduciendo el diámetro real en la salida, este análisis se presenta en el Anexo [6.1].

$$u_{teorica} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4.2)$$

$$Re = \frac{u_{teorica}\rho_f D_0}{\mu_f} \quad (4.3)$$

$$Cd = \frac{\dot{m}_f}{A_0\sqrt{2\rho_f\Delta p}} \quad (4.4)$$

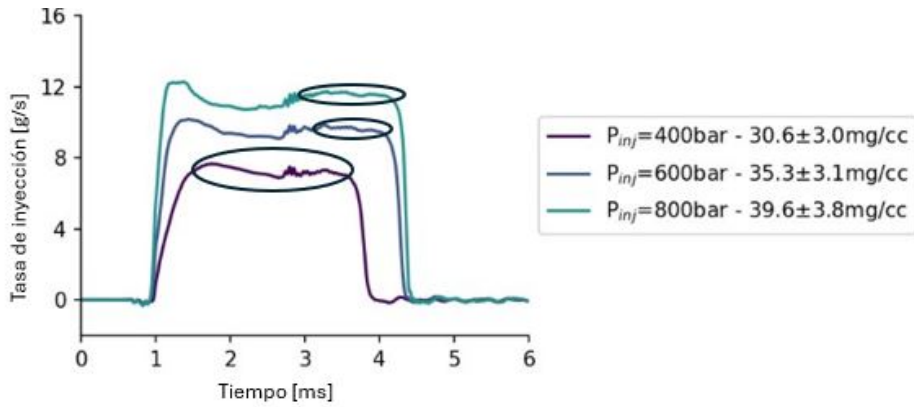


Figura 4.13. Intervalos de medida del caudal medio \dot{m}_f

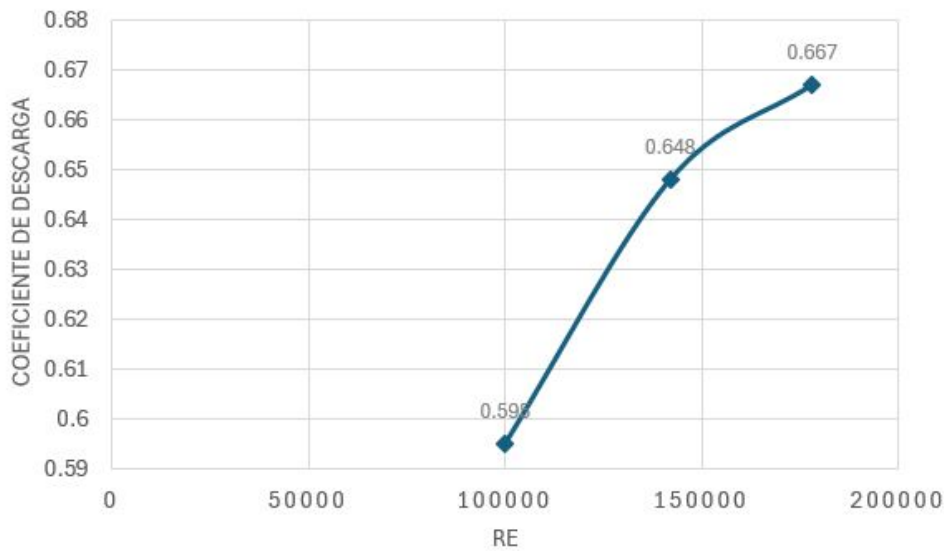


Figura 4.14. Análisis del coeficiente de descarga

En la figura [4.14] se aprecia claramente que el coeficiente de descarga aumenta con el número de Reynolds, es decir, a mayor presión de inyección, mayor coeficiente de descarga se tendrá.

Este valor progresaría hasta alcanzar un estado asintótico debido al alcance de un régimen desarrollo turbulento, este estado se corresponde con presiones muy elevadas, en nuestro caso, solo tenemos presiones de hasta 800 [bar], por lo que solo se contempla como empieza a entrar en el régimen turbulento, correspondiendo las menores presiones de inyección a un régimen laminar o transitorio.

4.2.2. Medidas de cantidad de movimiento

Al igual que en el postprocesado de los ensayos en tasa, los resultados correspondientes a las medidas de cantidad de movimiento también se procesan en el software *xtasutiles*.

Como se puede ver en la figura [4.15], en la que se muestra una medida del Inyector 250-2 con una presión de inyección de 800 [bar], esta imagen muestra la corrección de cola, la presión de inyección, la contrapresión, el pulso y la aproximación de las 50 repeticiones. Por último, como se ha especificado en el plan de ensayos [4.1], recordar que solo se realizarán los ensayos para la contrapresión de 40 [bar] y para el tiempo de energización de 2000 [μ s].

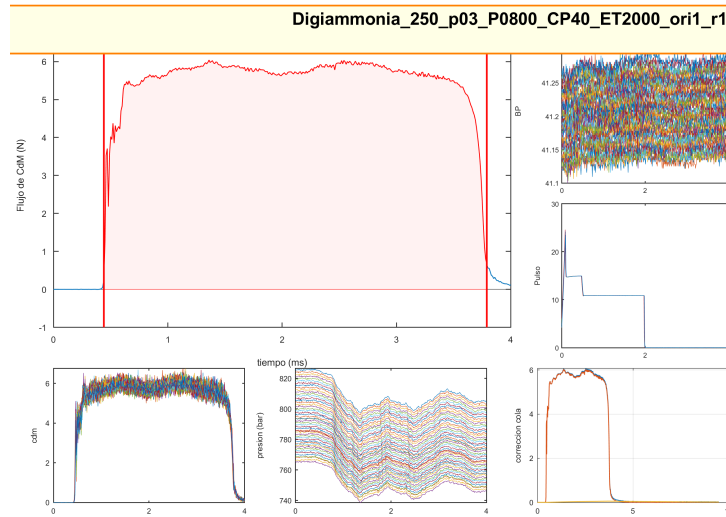


Figura 4.15. Ejemplo de las medidas de CdM

Influencia de la presión de inyección

En lo que respecta a la presión de inyección en las medidas de CdM, se muestra el análisis del inyector 250-2.

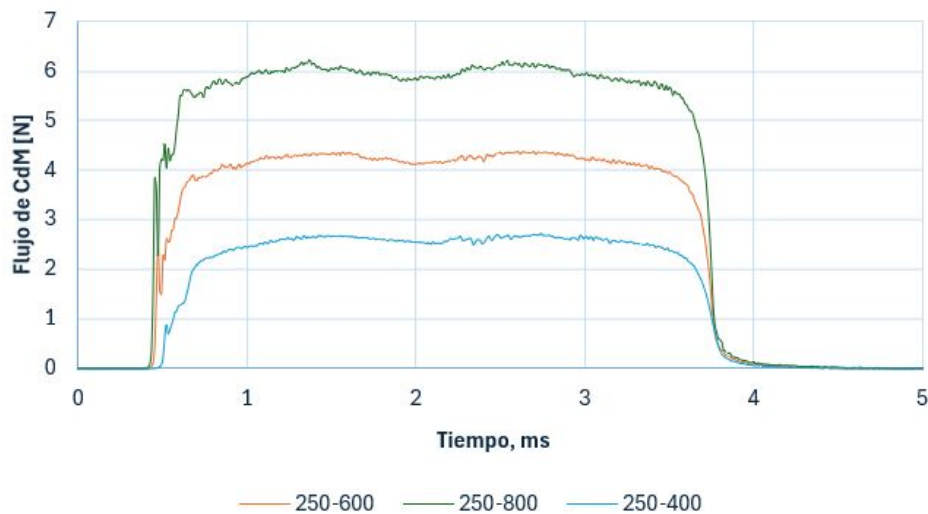


Figura 4.16. Influencia de la presión de inyección en las medidas de CdM

Lo más destacable en el análisis de la figura [4.16], es la obtención de los resultados

esperados acordes a la teoría, es decir, mayor flujo de cantidad de movimiento a medida que aumentamos la presión de inyección.

Influencia del diámetro de la tobera

En este último análisis para el combustible diésel se analizará la diferencia del diámetro de la tobera, es decir, la diferencia entre los dos inyectores para una misma presión de inyección (600 [bar]).

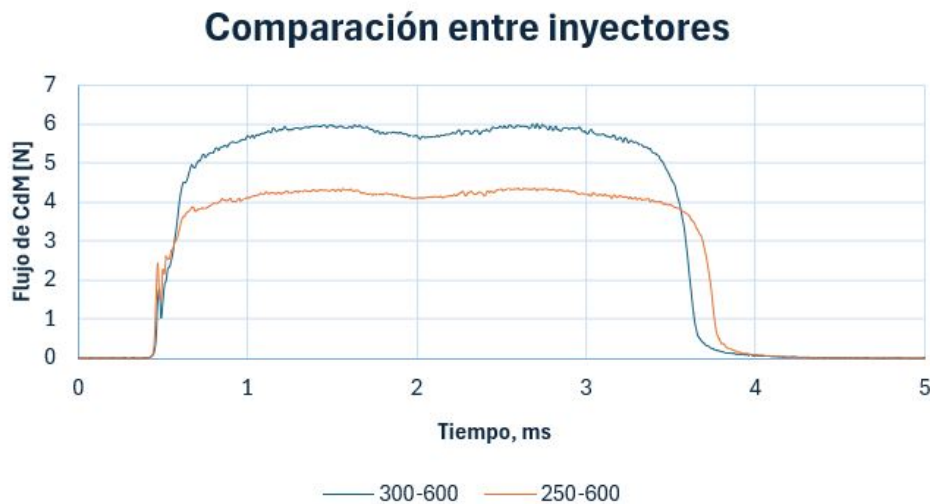


Figura 4.17. Influencia del diámetro de la tobera en las medidas de CdM

De nuevo, se vuelve a tener concordancia con lo esperado, pues a mayor diámetro de la tobera, mayor flujo de cantidad de movimiento. Sin embargo, también es destacable el retraso en el cierre del inyector 250-2.

4.3. Caracterización con NH_3

El procedimiento de postprocesado para estos ensayos, al igual que en los ensayos con el combustible diésel, está igualmente basado en el software *xtrasutiles*, por lo que no se volverá a comentar.

Asimismo, se recuerda que se tratará de obtener la señal de tasa a partir de las medidas de cantidad de movimiento.

4.3.1. Medidas de cantidad de movimiento

En la figura [4.18] se muestra una de las primeras repeticiones de las medidas del ensayo de cantidad de movimiento con el combustible amoníaco, convirtiéndose el instituto CMT

con el proyecto público *Digiammonia* en el primer instituto de investigación que realiza ensayos públicos de cantidad de movimiento con amoníaco puro.

A lo largo de esta sección, los ensayos serán analizados sin precedentes con este combustible, por lo que cabe esperar cualquier discrepancia con el combustible de referencia.

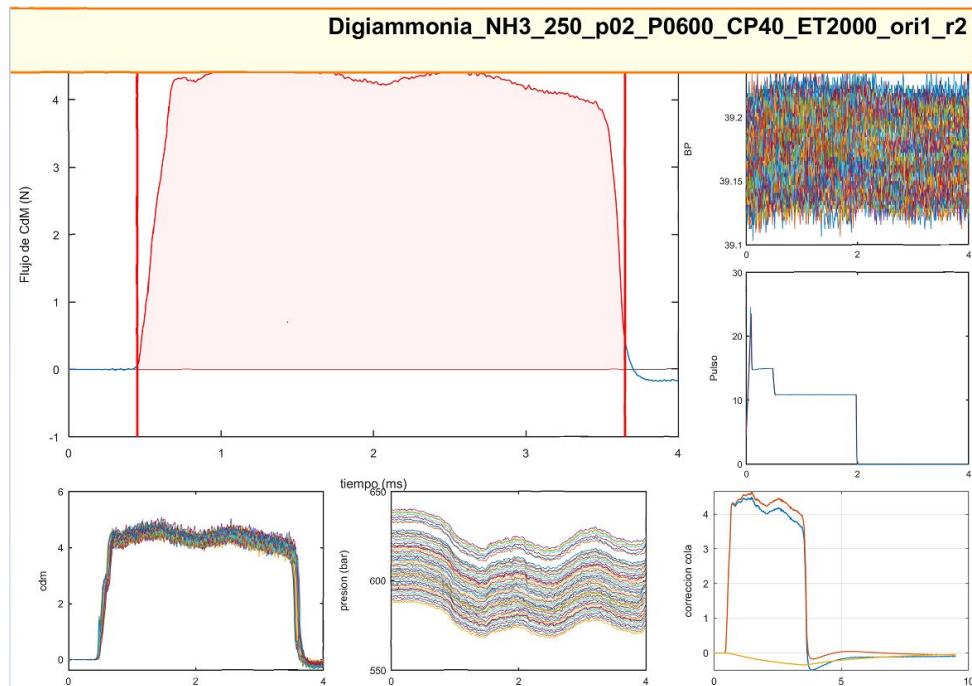


Figura 4.18. Ensayo de medida de CdM con NH_3

La primera discrepancia observada se corresponde con que todas las medidas en los ensayos de CdM de amoníaco descienden su señal por debajo de 0, esto no tendría sentido a priori, pues no existe combustible de retorno en la maqueta. En primer lugar, se planteó una posible solución, y es que como ya se ha explicado en el apartado [3.1.11], el combustible en el retorno es presurizado con el fin de que el NH_3 no pierda temperatura, no cambie de fase y por lo tanto, no congele la maqueta. Se cree que esta discrepancia tiene su base en dicha presurización. Este análisis conlleva a realizar un nuevo apartado [4.4], en el que también se presurizará el diésel en el retorno, comprobando si se demuestra que este descenso de la señal hasta números negativos tiene su base en esta presurización, de esta manera, también se consigue obtener la comparación de ambos combustibles en una completa igualdad de condiciones.

Influencia de la presión de inyección

Al igual que con el combustible de referencia, también se analiza la influencia de la presión de inyección, con el objetivo de obtener resultados similares. Dicho análisis se muestra en la figura [4.19] para el inyector 250-2.

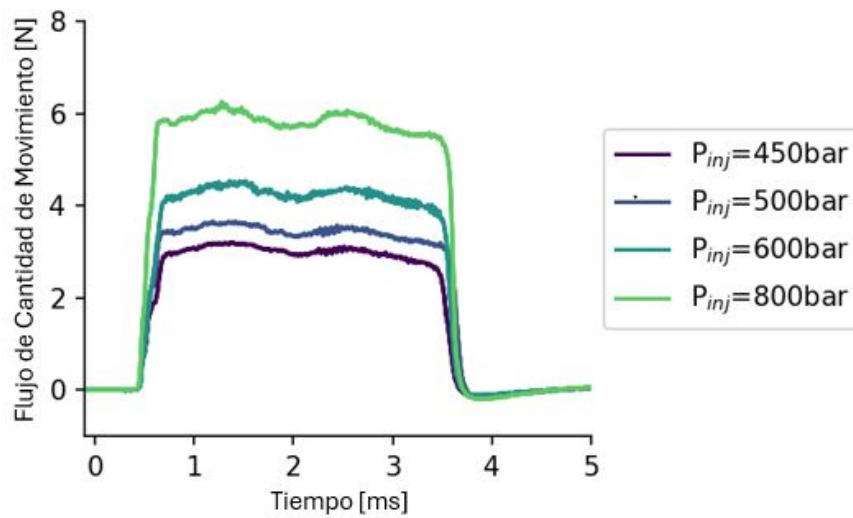


Figura 4.19. Influencia de la presión de inyección con amoníaco en CdM

Como se muestra en la figura [4.19], se obtienen resultados similares a los del combustible de referencia, cumpliendo con lo esperado, es decir, obteniendo mayor flujo de cantidad de movimiento cuánto mayor sea la presión de inyección.

Se destaca que no fue posible realizar el ensayo con la presión de inyección de 400 [bar] ya que la bomba no podía trabajar a tan bajas presiones con este combustible, sin embargo, se añadieron las medidas de 450 [bar] y 500 [bar], con el fin de obtener mejores resultados en la correlación que se desarrollará para obtener la señal de tasa en amoníaco.

Diámetro de la tobera

En esta sección se vuelven a comparar los dos inyectores sometidos a estudio con el fin de caracterizar la influencia del diámetro de la tobera para el combustible amoníaco a la misma presión de inyección (450 [bar]).

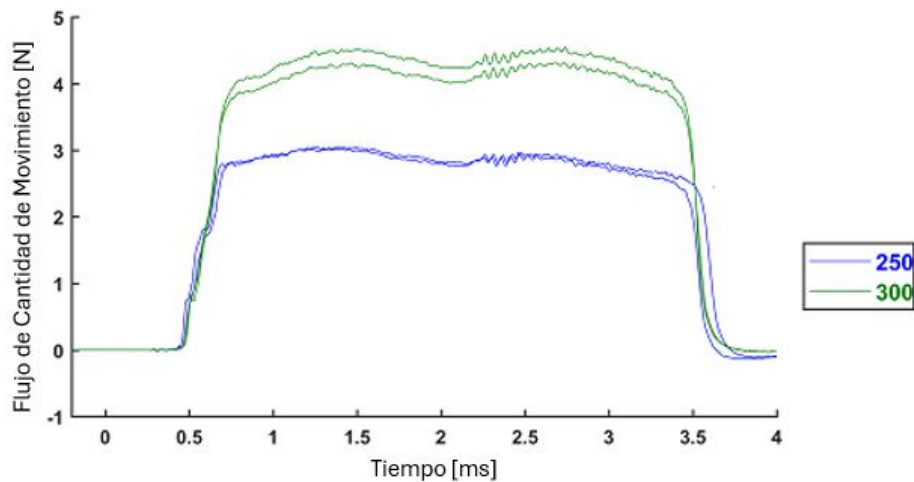


Figura 4.20. Influencia del diámetro de la tobera con amoníaco en CdM

En la figura [4.20] se observa que a mayor diámetro de la tobera mayor flujo de cantidad de movimiento, como se esperaba. Sin embargo, en otras medidas también aparece un retraso en el cierre del inyector 250-2 con respecto al inyector 300-2 y un adelanto en la apertura, dichos hechos se comentarán en el análisis de la influencia del amoníaco [4.5].

4.3.2. Análisis de tasa

Como ya se ha citado en el plan de ensayos [4.1], el tasímetro no es capaz de soportar amoníaco, por lo que las medidas de tasa para este compuesto se obtendrán mediante una correlación obtenida a partir de la relación que se establece entre medidas de tasa y cantidad de movimiento. Por ello, a partir de la relación entre las medidas de tasa y cantidad de movimiento de diésel se calcularán las medidas de tasa para este compuesto. En la figura [4.21] se muestra un esquema de lo que va a consistir la obtención de la señal de tasa, este esquema muestra las curvas de cantidad de movimiento del inyector 300-2 para la presión de inyección de 600 [bar] y la contrapresión de 40 [bar] en el combustible diésel y amoníaco y la señal de tasa para estas condiciones del combustible diésel, quedando como interrogante la señal de tasa en amoníaco.

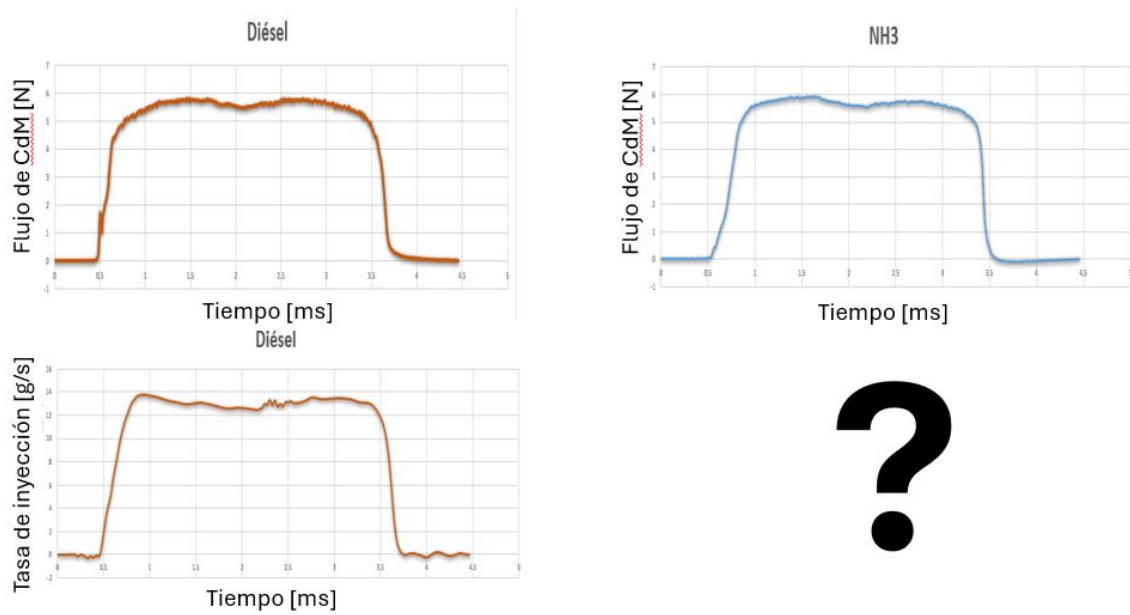


Figura 4.21. Esquema obtención de la señal de tasa

El procedimiento seguido para obtener la señal de tasa es el siguiente:

1. Las curvas correspondientes a las señales de tasa y CdM para diésel y las curvas correspondientes a la señal de CdM para NH_3 han sido desglosadas en tres segmentos como los que se pueden observar en la figura [4.22].

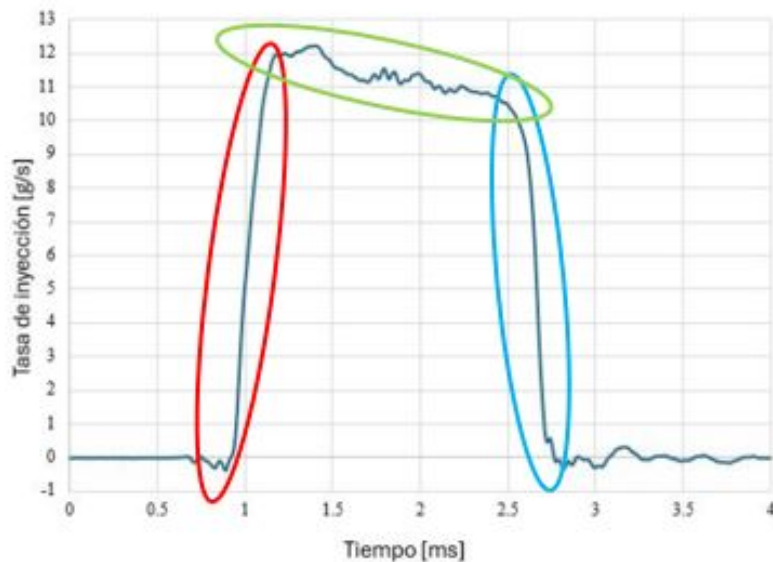


Figura 4.22. División en segmentos de las curvas

2. Después se calcularán los coeficientes m y b de la ecuación [4.5] necesarios para el primer segmento (color rojo), a su vez, con el código empleado se plantea que cuando la recta ascendente que se autocalcula posea un coeficiente de error $R^2 < 0.9$ se añada

un nuevo segmento, con el fin de obtener una gran precisión en los resultados.

$$y = mx + b \quad (4.5)$$

3. En lo que respecta a los valores constantes del tramo verde son mucho más sencillos, pues el parámetro necesario para la extrapolación es una división entre ambas señales.
4. Se repite el apartado [2] pero en este caso para la pendiente descendente, en el que los parámetros tendrán signo contrarios.
5. Se dividen los parámetros obtenidos en las señales de tasa y CdM obteniendo la relación punto a punto de ambas gráficas.

Finalmente, se obtiene la señal de tasa de la figura [4.23], para el inyector 300-2, la contrapresión de 40 [bar] y la presión de inyección de 600 [bar].

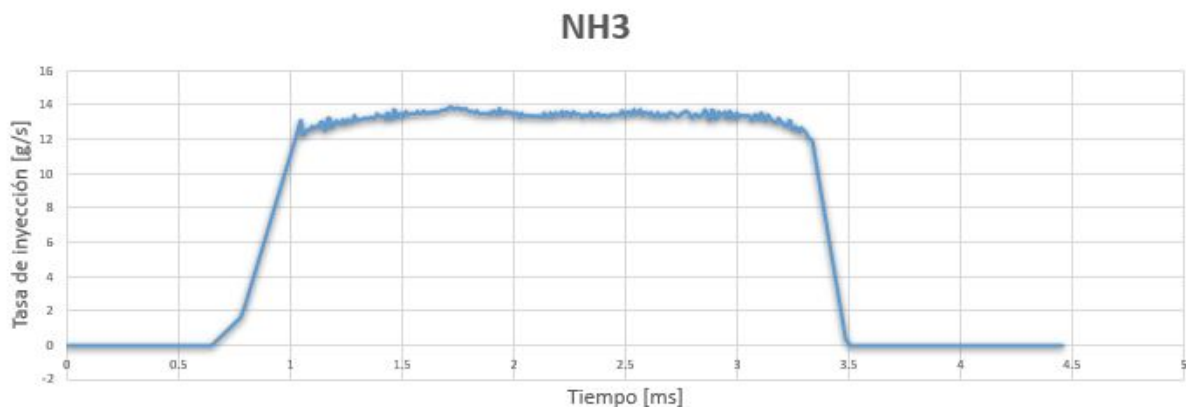


Figura 4.23. Señal de tasa en amoníaco

Como se puede observar, se ha obtenido una curva bastante parecida a las obtenidas para la señal de tasa de diésel, sin embargo, esta señal no es concluyente, con el fin de caracterizar los resultados, se compararán detalladamente las señales de diésel y NH_3 en el apartado [5].

4.4. Medidas con diésel presurizado en el retorno

Como se acaba de mencionar en el apartado anterior, debido a la incongruencia apreciada en las medidas de amoníaco se decidió añadir este apartado con el fin de encontrar una explicación. Este apartado podría demostrar que el descenso de las medidas de flujo de CdM tiene su base en la presurización del retorno.

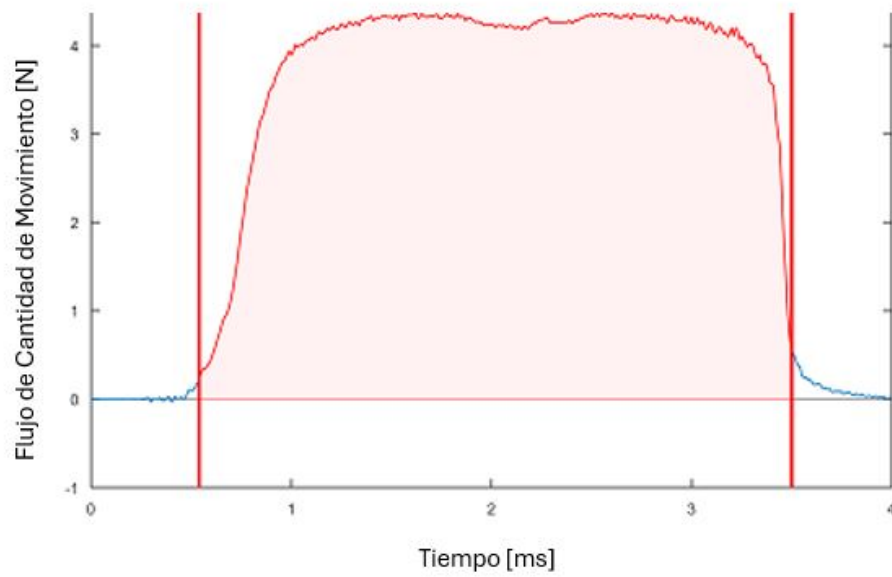


Figura 4.24. Señal de CdM en diésel con el flujo de retorno presurizado

Como se puede observar en la figura [4.24], estos resultados no descienden por debajo de cero, por lo que la presurización del retorno no sería la explicación de este hecho en los ensayos con amoníaco.

Se debatirán otras posibilidades en el capítulo [5].

4.5. Análisis de la influencia del amoníaco

A lo largo del presente apartado se tratará de buscar explicación a los puntos singulares y a las irregularidades presente en cualquiera de los ensayos. Asimismo, se detallará la explicación de por qué el amoníaco ha de ser caracterizado, como ya se trató en el apartado [2.6]. Si se rescata de nuevo la figura [2.17], se muestra de nuevo la diferencia al comienzo de la inyección entre ambos combustibles, ya que la diferencia existente para un avanzado ASOI se basa en las características de combustible.

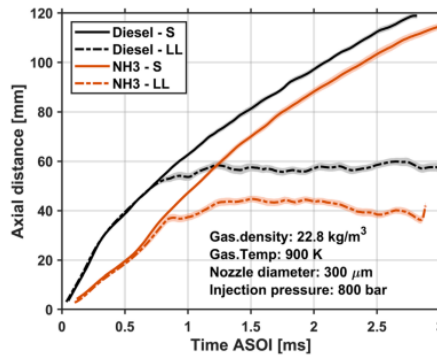


Figura 4.25. Evolución del chorro de los combustibles diésel y amoníaco en estado líquido y gaseoso [14]

A lo largo de este proyecto, se trataba de buscar explicación a esta diferencia en el proceso inicial de la inyección, y se ha descubierto lo siguiente fruto de la comparación de ambos inyectores para el combustible de amoníaco y la presión de inyección de 800 [bar]

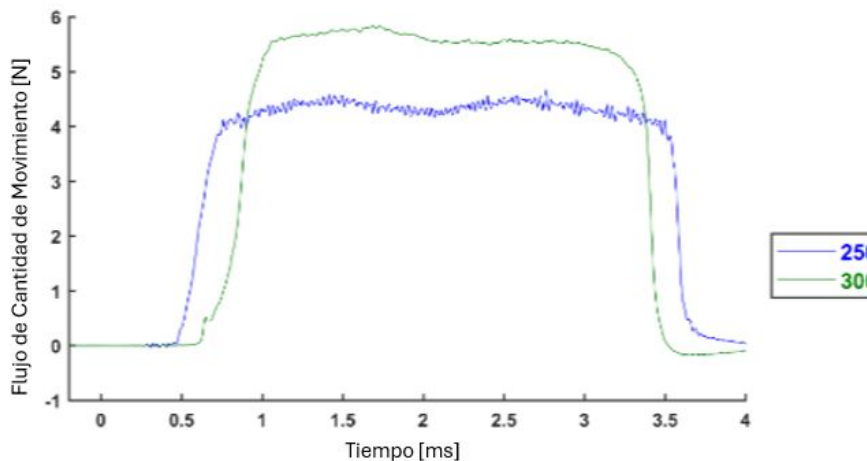


Figura 4.26. Diferencias en el retraso y cierre del proceso de inyección

En la figura [4.26] se muestra como para el inyector 300-2 existe un retraso en la apertura y un adelanto en el cierre de la inyección. Adicionalmente se ha visto una alta

dispersión en las 50 repeticiones en algunos puntos (especialmente a 600 bar de presión de inyección).

Con base en estos resultados se entiende la necesidad de caracterizar el amoníaco, ya que se necesita cuantificar la cantidad que se inyecta y cómo se inyecta, que hasta ahora era algo desconocido,

No existen sistemas comerciales que puedan medir esta magnitud (gasto másico tasa de inyección). El método propuesto ha podido cuantificar esta variable e identificar diferencias de operación entre los dos inyectores. Las discrepancias en la apertura y cierre del inyector (que no se habían podido registrar hasta ahora) se deben a diferencias en el funcionamiento del inyector, porque el combustible NH_3 tiene propiedades físicas diferentes al diésel (diferente densidad, viscosidad, presión de vapor, etc.) que afectan a la dinámica de los elementos internos.

Es bastante probable que el fluido esté cambiando de fase (de líquido a vapor) dentro de los conductos del inyector, alterando el levantamiento y cierre de la aguja.

4.6. Comparación entre combustibles. Análisis de resultados

En primer lugar, en lo que respecta a cantidad de movimiento, se muestra la comparación para el inyector 300-2 a la presión de inyección de 600 [bar].

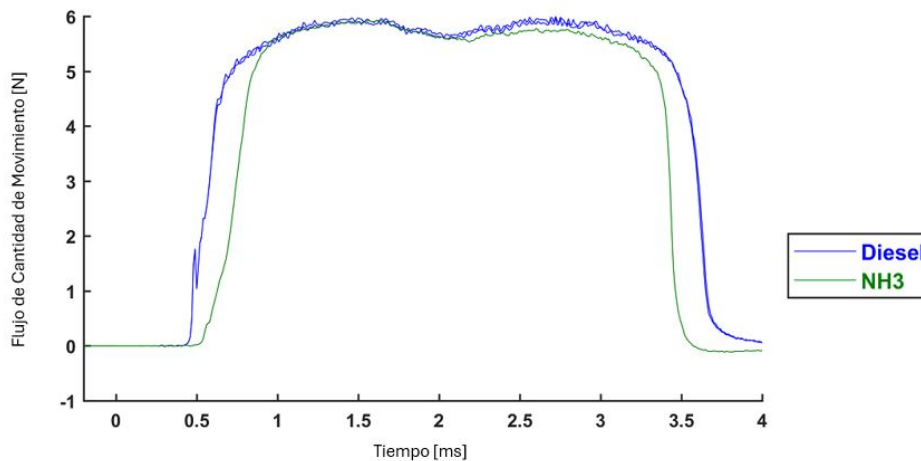


Figura 4.27. Comparación de flujo de CdM entre diésel y amoníaco

La figura [4.27] proporciona unos resultados completamente sorprendentes debido a la similitud de ambos combustibles en esta magnitud.

Para comprobar la diferencia entre el amoníaco y el diésel también presurizado en el retorno, así como poder dar explicación a la incongruencia observada en las medidas de amoníaco se presenta la figura [4.28].

Como se puede observar, el ensayo con diésel presurizado en el retorno

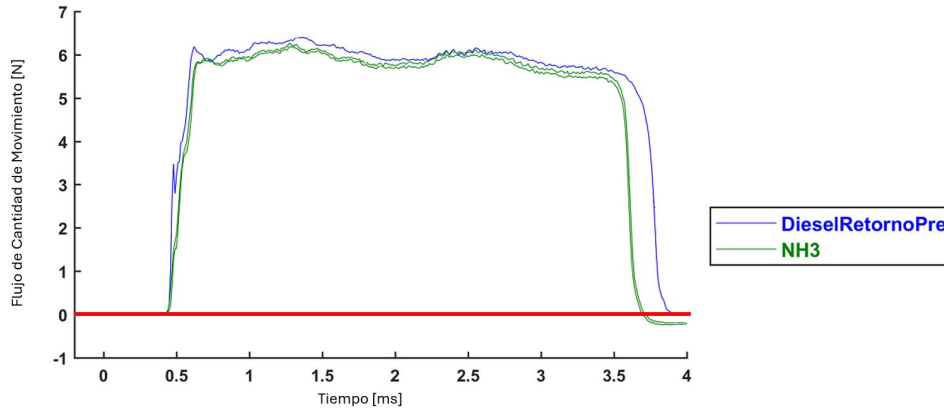


Figura 4.28. Comparación de flujo de CdM entre diésel presurizado en el retorno y amoníaco

Se puede observar que el diésel presurizado en el retorno no desciende a valores negativos, por lo que la presurización en el retorno no es la explicación de dicho descenso en las medidas de amoníaco, como se ha explicado en el apartado [4.4].

Se cree que dicha incongruencia tiene su explicación en la temperatura a la que el amoníaco hace operar a la maqueta, cuando el NH_3 es inyectado en la maqueta comienza a expandirse, y por ende, a bajar su temperatura, llegando a alcanzar temperaturas muy bajas, lo que hace que los sensores impuestos en la maqueta presenten mucho ruido ante tanta variación de temperatura. Esta es otra irregularidad que no debería de ocurrir, sin embargo, al igual que la dispersión en la comparación de inyectores presentada en el anterior apartado, tiene su base en el uso de este compuesto. En conclusión, esta dispersión se debe a las propiedades del compuesto, que se expande de manera diferente, afectando a la señal del sensor.

Por lo que en lo que respecta a la inyección de NH_3 se debe decir que su proceso y tiempo de inyección han de ser exhaustivamente analizados en el futuro con el fin de caracterizar este tipo de dispersiones y poder otorgarles solución.

En lo que respecta a las medidas de tasa, se presenta la comparación entre el combustible de referencia y el amoníaco en la figura [4.29].

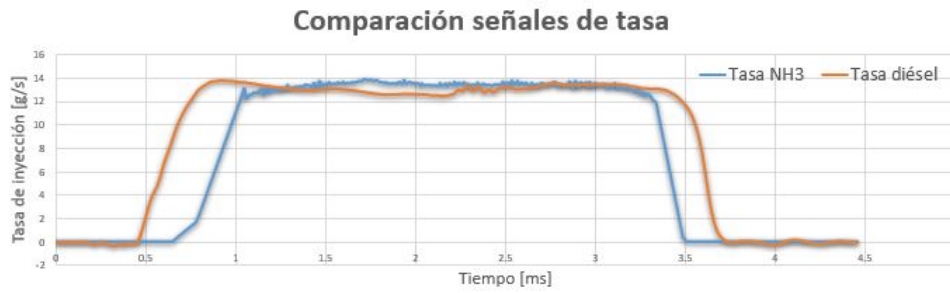


Figura 4.29. Comparación de las señales de tasa de amoníaco y diésel

Al igual que en las medidas de cantidad de movimiento, se presentan resultados parejos entre ambos combustibles, lo que hace pensar que existe un posible sustituto a los combustibles fósiles. Además, se puede creer en la corrección de los resultados del modelo de obtención de tasa tras presentar igualmente el retraso en la apertura del inyector y el adelanto en el cierre, obteniendo un tiempo de inyección inferior.

Capítulo 5

Conclusiones

Durante este Trabajo Final de Grado se ha caracterizado el proceso de inyección directa con NH_3 en condiciones análogas de motor en términos de presión de cámara de combustión. Para la realización del trabajo se ha dispuesto de una instalación experimental para caracterizar la inyección a través de la medida del flujo de cantidad de movimiento.

El proceso de inyección se analizó para diferentes niveles de presión y dos diámetros de toberas mono-orificio. Los resultados obtenidos se han comparado con un combustible de referencia. Para conseguir los objetivos planteados, se ha puesto a punto la instalación de medida de tasa de inyección (tasímetro) y la de cantidad de movimiento, esta última se ha acondicionado para poder trabajar con el NH_3 .

Con base en las comparaciones presentadas en el capítulo de resultados [4.6], se puede concluir que después de hacer ciertas modificaciones en el sistema de inyección, el NH_3 puede ser un posible sustituto a los combustibles fósiles, esto se debe a los siguiente

- La tasa de inyección de ambos combustibles es similar aunque menor para el NH_3 , esto quiere decir que la tasa de flujo de combustible, es decir, la cantidad de combustible inyectado por unidad de tiempo para el amoníaco es aceptable, aunque ligeramente inferior a la del diésel convencional
- La duración de la inyección y su perfil (curva de la inyección) pone en evidencia la forma de la tasa de inyección a lo largo del tiempo, pudiendo revelar detalles sobre la apertura y cierre del inyector, que posteriormente afectará a la evolución del chorro y su atomización.
- El análisis de flujo de cantidad de movimiento muestra que el amoníaco posee características de inyección comparables al diésel.

Además, se destaca que se han conseguido los objetivos propuestos para el proyecto:

- Se ha conseguido desarrollar un modelo de obtención de la señal de tasa de un combustible a partir de su señal de CdM y las señales de CdM Y de tasa de un combustible de referencia.

- Se han preparado las herramientas y la instalación experimental correctamente y sin incidentes para el desarrollo del proyecto.
- Se ha logrado analizar las diferencias y similitudes de ambos combustibles.

En base a la comparación de ambos combustibles, se puede decir que se abren unas nuevas vías de investigación a un combustible alternativo para plantas propulsivas y generación de potencia. Los resultados de este proyecto contribuyen en la comprensión de combustibles sostenibles que ayuden a disminuir las emisiones contaminantes y a los ODS 7 (Energía Asequible y No Contaminante) y al ODS 13 (Acción por el Clima). Este proyecto ha supuesto la primera piedra en el camino de investigación de este nuevo combustible con unos resultados relevantes, además de convertirse en la primera base de datos experimental disponible de NH_3 en reportarse en la literatura

En el horizonte se presenta el análisis de la combustión y de prestaciones del NH_3 , sin embargo, los buenos resultados obtenidos en tasa y cantidad de movimiento llegan para ilusionar al CMT en esta vía de investigación, ya que otro de los problemas que presentaba en anteriores investigaciones el uso de amoníaco era su difícil almacenaje y este problema puede ser mitigado por la tecnología actual, además, posee menor incidencia en el transporte pesado (camiones y sector aeronáutico o marítimo).

Capítulo 6

Anexo

6.1. Análisis diámetro inyector 250-2

Tras obtener unos resultados de tasa menores a los esperados se sometió este inyector al servicio de microscopía electrónica de la UPV, mediante la técnica de Rayos X.

Esta técnica permite obtener con una elevada precisión imágenes a una escala muy diminuta, como puede ser la de $250\ \mu\text{m}$.

Una vez planteado esto, se describe el proceso de medida del diámetro de la circunferencia, para ello, se ha dividido el diámetro de la tobera en tres subsecciones, como se puede ver en la figura [6.1] y en cada subsección se han aproximado 8 rectas pasantes por el centro de cada circunferencia y tres circunferencias sobre la imagen, siendo el promedio total del diámetro el promedio estimado de la distancia de todas las rectas y de todas las circunferencias.

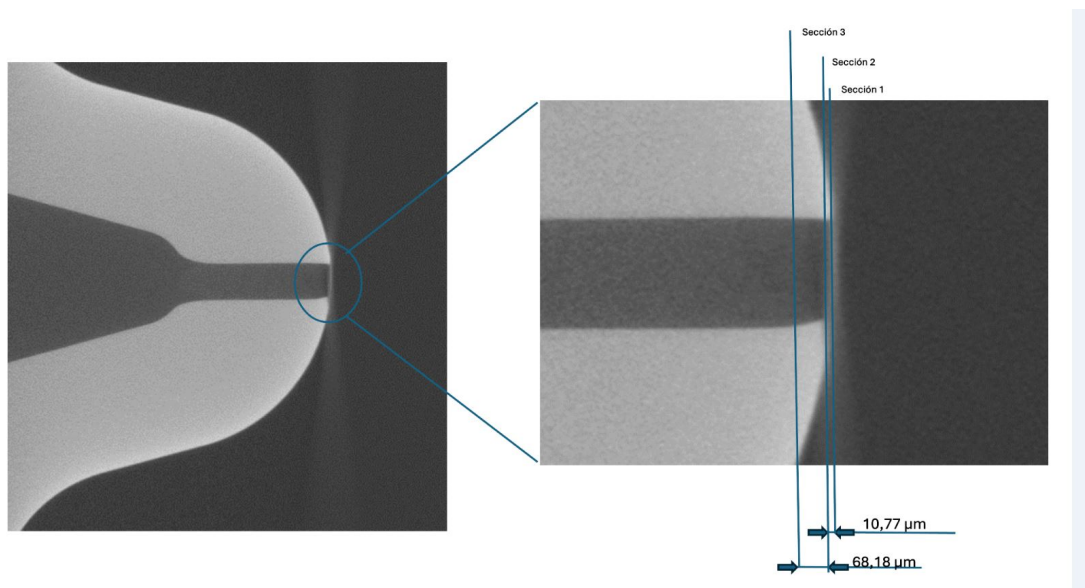


Figura 6.1. Ampliación de las secciones de medida de la tobera

En la imagen [6.2] se puede observar una de las secciones propuestas para la medida, con sus 8 rectas pasantes por el centro de la circunferencia y las tres circunferencias.

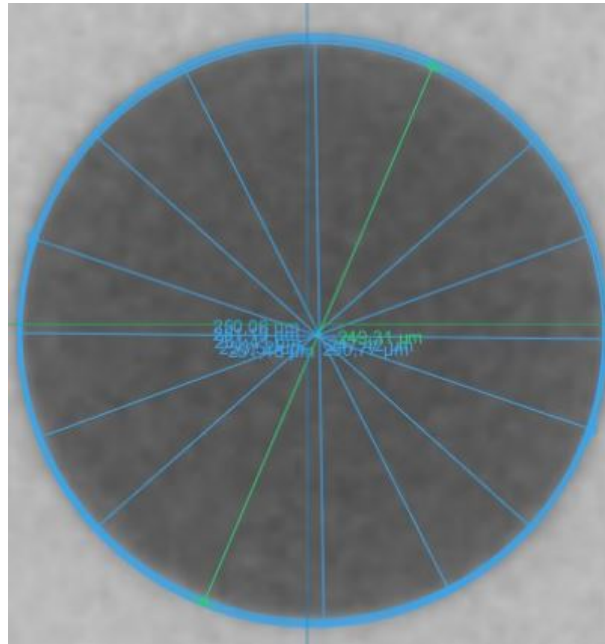


Figura 6.2. Ejemplo de medida del diámetro de una circunferencia

Finalmente el resultado obtenido para el diámetro de la tobera del inyector 250-2 es:

$$D_0 = 241,67[\mu m] \quad (6.1)$$

Bibliografía

- [1] <https://www.theengineeringconcepts.com/haber-process>. Consultado en enero 2024.
- [2] <https://h2businessnews.com/preparan-el-primer-vuelo-de-avion-con>. Consultado en enero 2024.
- [3] https://www.elconfidencial.com/tecnologia/novaceno/2022-03-01/nuevo-combustible-viajes-espaciales-baratos_3383472/. Consultado en enero 2024.
- [4] <https://hipertextual.com/2022/08/north-american-x-15-avion-hipersonico>. Consultado en enero 2024.
- [5] <http://inyecciondiesel.blogspot.com/>. Consultado en febrero 2024.
- [6] <https://sensores-de-medida.es/wp-content/uploads/2017/>. Consultado en febrero 2024.
- [7] https://cdn.pkwteile.de/uploads/360_photos/7672313/h-preview.jpg. Consultado en febrero 2024.
- [8] <https://www.fullmecnica.com/definiciones/i/645-inyeccion-indirecta>. Consultado en febrero 2024.
- [9] <https://www.talleresyrepuestos.com/documentacion-tecnica/inyeccion-electronica-de-combustible/602-partes-que-conforma-el>. Consultado en febrero 2024.
- [10] <https://www.gbremam.com/post/the-ultimate-guide-common-rail-diesel-technology>. Consultado en febrero 2024.
- [11] https://www.blogmecanicos.com/2020/02/injector-piezoelectrico_14.html. Consultado en febrero 2024.
- [12] <https://crea.ujaen.es/jspui/bitstream/10953.1/14632/1/TFG%20Manuel%20Cobo.pdf>. Consultado en febrero 2024.
- [13] Desantes, J.M., Pastor, J.V., García-Oliver, J.M. y Pastor, J.M. *A 1D model for the description of mixing-controlled reacting diesel sprays*. Universitat Politècnica de València, 2009.

- [14] Payri R, Bracho G, García-Oliver J. y Jiawei C. *Experimental characterization of direct injection liquid ammonia sprays under non-reacting diesel-like conditions*. Universitat Politècnica de València, 2011.
- [15] Payri R, Bracho G, Soriano, J.A., Fernández-Yáñez, P, y Armas O. *Nozzle rate of injection estimation from hole to hole momentum flux data with different fossil and renewable fuels*. Universitat Politècnica de València, 2011.
- [16] Bracho G, García-Oliver J, Jiawei C. y de la Morena J. *Direct injection ammonia spray characterization under non-reacting diesel-like conditions*. Universitat Politècnica de València, 2011.
- [17] Bracho G, Gimeno J, Salvador F.J. y Payri R, *The effect of temperature and pressure on thermodynamic properties of diesel and biodiesel fuels*. Universitat Politècnica de València, 2011.
- [18] Payri, F y Desantes, J.M. *Motores de combustión interna alternativos*. Universitat Politècnica de València, 2011.
- [19] Doménech, V. *Desarrollo y aplicación de la medida del flujo cantidad de movimiento de un chorro diésel*. Universitat Politècnica de València, 2013.
- [20] Gimeno, J. *Desarrollo y aplicación de la medida del flujo cantidad de movimiento de un chorro diésel*. Universitat Politècnica de València, 2015.
- [21] De la Morena, J. *Estudio de la influencia de las características del flujo interno en toberas sobre el proceso de inyección diésel en campo próximo*. Universitat Politècnica de València, 2015.

Parte II

Pliego de condiciones

1. Introducción

A lo largo de esta parte se desarrollarán y se citarán todas las condiciones, necesidades y requisitos de obligado cumplimiento que han de cumplir los dos laboratorios, así como el mantenimiento que hay que realizar a todas las piezas e instrumentos.

De este apartado es especialmente interesante las medidas de seguridad que se tienen en cuanto al amoníaco, así como el circuito interior del instituto de investigación para la ventilación del amoníaco y para su extracción en caso de fuga.

En primer lugar se expondrán los sistemas de seguridad de ambas instalaciones sin tener en cuenta el amoníaco como combustible (apartados [2] y [3]), el apartado [4] expondrá la necesidad del mantenimiento en la instalación, mientras que los apartados [5] y [6] serán exclusivamente dedicados a la seguridad necesaria cuando se esté utilizando el amoníaco como combustible.

2. Sistema de seguridad del laboratorio de inyección y de medida de cantidad de movimiento

2.1. Dispositivos de seguridad y materiales de los laboratorios

En cuanto a los sistemas de seguridad de los laboratorios de tasa de inyección y del de cantidad de movimiento serán tratados conjuntamente debido a que las medidas de seguridad que hay, la instalación y el procedimiento seguro serán completamente similares.

Ambos laboratorios constan de un sistema de ventilación, es decir, son capaces de renovar el aire por este sistema sin necesidad de entrar en contacto con el exterior.

A su vez, los dos laboratorios están contruidos sobre suelos antideslizantes, esto es lo común en este tipo de instalaciones, ya que ante cualquier imprevisto puede haber fuga de combustibles y cualquier accidente o resbalón se puede traducir en daños físicos y materiales.

Las salas están completamente aisladas del exterior de forma que están completamente insonorizadas con el fin de amortiguar el ruido generado para que no moleste al exterior y también, para que no penetre en salas adjuntas donde puede llegar a ser muy repetitivo y molesto.

En lo que respecta a sistemas contra incendios las protecciones principales son dos protecciones activas, existe un extintor en cada laboratorio y el siguiente sistema de protección constaría al sistema de ventilación, que al igual que es capaz de regenerar el aire de ambas salas, también podría extraer el oxígeno y aislar al fuego del exterior. A su vez, también existen varios métodos de protección pasiva, como podrían ser los materiales de construcción de la sala al ser muy poco inflamables y prácticamente ignífugos. Aún así, en caso de accidente existen multitud de sensores de incendios a lo largo de todo el institu-

to CMT, repartidos estratégicamente en puntos clave y en puntos peligrosos, de manera que cualquier incidente sería rápidamente reportado y el instituto seguirá el protocolo de accidente que se verá en el apartado [6].

En ambas salas también se dispone de protección eléctrica ya que existe un elemento magneto-térmico-diferencial independiente del resto de edificio en cada sala para poder regular los cortocircuitos y las subidas de tensión de manera que ante cualquiera de ambos casos se deriven ambas situaciones a una conexión a tierra.

A su vez, se dispone de una instalación de aire comprimido para abastecer la sala cuando sea necesario.

En lo que respecta al suministro de agua, esta es impulsada por bombas de circulación a lo largo de tuberías de hierro galvanizadas y son equipadas con válvulas de paso con el fin de tener la posibilidad de cortar el abastecimiento. La principal necesidad de agua viene del circuito de refrigeración global del CMT, enviando agua con glicol para obtener un gran poder refrigerante directamente en el porta-inyector.

En cuánto al cableado, todas las conexiones están completamente aseguradas y expuestas en zonas donde no sea necesario el paso en ningún momento para la instalación, evitando posibles tropiezos.

El tema de vibraciones es claramente considerado en las herramientas experimentales, instalando todos los componentes de los laboratorios sobre soportes antivibrantes (motor eléctrico, bomba de alta presión, tasímetro o maqueta de CdM, etc.)

A continuación, se ha de hablar de uno de los dispositivos más peligrosos en estas instalaciones, que corresponde al depósito de nitrógeno. El dispositivo de nitrógeno, que ya se ha explicado en el apartado [3.1.10], debe permanecer cerrado en todo momento, esta salida de nitrógeno está regulada por un manorreductor o regulador de presión para los casos en los que se necesite nitrógeno poder regular la contrapresión deseada en los ensayos.

El recipiente debe estar posicionado de manera vertical, asegurando que no pueda volcar. Asimismo, también se ha de asegurar que está completamente aislado de calentamientos y de contacto con combustibles detonantes.

El nitrógeno es un gas incoloro e inoloro que no es peligroso en sí para el ser humano, sin embargo, puede llegar a desplazar el oxígeno en el aire pudiendo llegar a provocar mareos, pérdidas de conocimiento y en casos extremos, la muerte. Por ello, en ambos laboratorios se encuentran implantados detectores de oxígeno, existiendo un umbral por debajo del cuál se ha de trabajar en la salida del N_2 de la sala, que puede ser directamente expulsado al ambiente ya que no es peligroso para el medio ambiente.

Por último, en caso de accidente, el laboratorio dispone de un botiquín de primeros auxilios y de un lavavojos de emergencia, sin embargo, ante cualquier imprevisto grave, se ha de trasladar al herido inmediatamente al centro de salud más cercano.

2.2. Consideraciones para los operarios de la instalación

Se procede a exponer las condiciones y normas que han de cumplir los operarios de ambos laboratorios:

- En primer lugar, el acceso a la instalación ha de estar cerrado a cualquier personal no autorizado, tanto durante los ensayos como con la sala vacía. De la misma manera se ha de garantizar que el personal presente durante la realización de los ensayos sea el mínimo indispensable, siempre con la disposición de un técnico de laboratorio.
- La ventilación siempre ha de estar conectada con el fin de garantizar la correcta circulación del aire.
- Se ha de conectar el circuito de refrigeración global del CMT.
- A lo largo de las medidas los operarios del laboratorio han de ir equipados con guantes de trabajo para manipular la instalación, calzado adecuado y protectores auditivos si fuera necesario.
- El operario ha de mantener la sala limpia y ordenada de manera que cualquier derrame de combustible o aceite ha de limpiarse inmediatamente después de producirse.
- Se ha de monitorizar constantemente la instalación, de manera que los operarios puedan anticiparse a cualquier tipo de accidente o corregir cualquier tipo de fuga o derrame.

3. Arranque y parada de las instalaciones

3.1. Arranque de las instalaciones para medida de tasa y CdM

Con el fin de garantizar una correcta y segura puesta en marcha de ambos dispositivos se ha de tomar un conjunto de precauciones y seguir una serie de pasos.

1. Comprobar que existe el combustible suficiente para la realización del ensayo y que todos los componentes de la instalación están conectados de manera adecuada.
2. Encender la bomba de circulación del circuito de refrigeración global del CMT.
3. Encender PID y rack de temperaturas junto con el osciloscopio.
4. Encender el ordenador y abrir todo el software necesario para la instalación (regler, genotec, excel, etc.)
5. Comprobar que el diferencial magneto-térmico está dispuesto correctamente y conectar la instalación a la red eléctrica.

-
6. Se ha de cotejar que el sensor de contrapresión presente en el raíl comparta el mismo valor que el manómetro correspondiente a la botella de nitrógeno para de esta manera lograr la contrapresión deseada en el ensayo.
 7. Conectar la balanza y el amplificador de la señal de presión (en el caso de la maqueta de CdM).
 8. Poner en marcha el interruptor secundario y ajustar el resto de programas del ordenador para comenzar a realizar las medidas experimentales.
 9. En el ordenador ajustar la presión de inyección y el tiempo de energización progresivamente cada vez con intervalos de aumento menores para garantizar la integridad de la instalación.

3.2. Parada de medida en las instalaciones

En primer lugar, como cualquier instalación de este tipo se dispone de un botón de emergencia que ejecuta el paro inmediato de la señal, presión y conexión, este botón solo debe de ser utilizado en caso de accidente o posible peligro.

En el resto de casos se han de seguir una serie de pasos con el fin de desconectar la instalación completamente de cualquier tipo de conexión, los pasos serían los siguientes:

1. Desconectar el interruptor secundario.
2. Disminuir la contrapresión de la maqueta hasta alcanzar la presión atmosférica y comprobar que no existe fuga de presión hacia el exterior del manorreductor presente en las botellas de N_2 .
3. Disminuir la presión en el raíl y en todas las líneas de alta presión del sistema de inyección hasta alcanzar la presión atmosférica, en este caso, no es necesario hacerlo progresivamente, sino que en el software *Regler* se emite la señal de 0 [bar] como presión de inyección.
4. Desconectar la balanza (instalación de tasa) y el amplificador de señal (instalación de CdM).
5. Apagar el sistema de refrigeración.
6. Apagar todo el software, osciloscopio y PID y rack de temperaturas al igual que el ordenador.
7. Desconectar la instalación del interruptor general con el fin de que no exista corriente ni tensión al salir de la sala.
8. Cerrar las válvulas de paso del circuito de refrigeración global del CMT en la instalación.
9. Vertir el combustible presente sobre la balanza de nuevo en el depósito del que se alimenta la instalación (caso de la instalación de tasa).

4. Mantenimiento de la instalación

En primer lugar, se entiende como mantenimiento al proceso que permite asegurar el funcionamiento continuado de un sistema según la fiabilidad y seguridad para las cuales ha sido diseñado.

En este proyecto, se desglosa el mantenimiento de las instalaciones en cuatro tipos:

- **Mantenimiento preventivo sistemático.** Conjunto de tareas realizadas en base a una periodicidad regular que asegure la fiabilidad del activo.
- **Mantenimiento preventivo basado en la condición.** Mantenimiento preventivo que parte de la evaluación de las condiciones físicas y el análisis de una pieza (o sistema) de donde se determinan las posibles acciones de mantenimiento posteriores. La evaluación de la inspección se puede realizar mediante la observación del operador y/o inspección y/o pruebas y/o monitorización de la condición de los parámetros del sistema, etc., según un cronograma, bajo petición o de forma continua.
- **Mantenimiento predictivo.** Mantenimiento preventivo basado en la condición mediante análisis periódico de donde se determina una tendencia en la degradación de la pieza o del elemento tratado. Se establece una relación entre el síntoma monitorizado y el fallo considerado.
- **Mantenimiento correctivo.** Este tipo de mantenimiento consiste en la utilización de la pieza hasta el fallo y reparación, lo que garantiza una inversión mínima. Por otro lado, solo puede ser utilizado en situaciones y componentes en los que no existan peligros de seguridad y costes de fallo, donde los paros de producción no sean críticos y donde existan políticas de renovación frecuente del material.

Como ya se sabe, las instalaciones poseen prácticamente los mismos elementos o activos, por lo que no se desglosará el mantenimiento en ambas instalaciones sino que se separará en elementos o activos, destacando que los componentes relativos al NH_3 (depósito y detectores) corresponden únicamente a la instalación de CdM mientras que el tasímetro corresponde únicamente a la instalación de tasa.

Los distintos tipos de mantenimiento, la acción de conservación de cada activo y el intervalo de mantenimiento se exponen en la tabla [4.1]

Activo o componente	Acciones	Tipo de mantenimiento	Intervalo
Inyector	Cambio	Mantenimiento Correctivo	
Tasímetro	Comprobación visual y limpieza	Mantenimiento preventivo sistemático y predictivo	Principio del proyecto tasa
Filtro de combustible	Limpieza	Mantenimiento predictivo	Principio de cada proyecto
Raíl	Cambio o reparación	Mantenimiento correctivo	
Sensor de presión	Prueba	Mantenimiento correctivo	
Osciloscopio	Prueba	Mantenimiento correctivo	
Botella de N_2	Comprobación visual y prueba	Mantenimiento predictivo	Principio de cada proyecto
Tuberías y rácores de combustible	Comprobación de fugas	Mantenimiento predictivo	Principio de cada proyecto
Regulador de presión	Comprobación	Mantenimiento predictivo	Principio de cada proyecto
Sensor de NH_3	Comprobación visual	Mantenimiento predictivo	Principio de cada ensayo
Conductos salida NH_3	Comprobar fugas	Mantenimiento predictivo	Principio del proyecto CdM
Circuito de estanque de NH_3	Comprobación fugas, saturación y limpieza	Mantenimiento predictivo	Principio del proyecto CdM
Motor eléctrico	Cambio o reparación	Mantenimiento correctivo	
Bomba de alta presión	Comprobar presión	Mantenimiento predictivo	Principio de cada proyecto
Cableado señales	Cambio	Mantenimiento correctivo	

Tabla 4.1: Tipo de mantenimiento y acción correspondiente a cada componente o pieza

Asimismo, en la gráfica se observan como celdas amarillas los componentes específicos de la maqueta de CdM mientras que en azul el único componente específico de la medida de tasa.

Como se puede comprobar, para los activos que suponen un mayor peligro se emplea el mantenimiento predictivo, para así poder adelantarse a este posible fallo y poder evitarlo. Por otro lado, aquellos componentes que tienen un fácil reemplazo o que no suponen peligro alguno en su fallo se emplea el mantenimiento correctivo.

5. Seguridad en las medidas de NH_3

Los apartados anteriores exponen las medidas de seguridad de ambos laboratorios y sus respectivos sistemas, sin embargo, se ha decidido apartar al amoníaco de estas medidas de seguridad que son obligatorias para poder desarrollar con expreso detalle cada una de las medidas de seguridad que se han de tener en cuenta a la hora de trabajar con este compuesto.

Se recuerda que estas medidas de seguridad solo están disponibles en el laboratorio de medida de cantidad de movimiento ya que, como se ha citado anteriormente, no se puede utilizar la maqueta de medida de tasa con este compuesto tan peligroso y corrosivo.

Por ello y recordando la peligrosidad del NH_3 presente en el apartado [2.4.1] se han de imponer los siguientes requisitos en lo que respecta al operario:

- Se ha de garantizar la no exposición a esta sustancia nociva, tóxica y corrosiva. Para ello, se ha de vestir un traje EPI en todo momento, junto a una máscara completa de presión positiva con filtros EN 14387:2004+A1:2014 (véase la figura [6.3]), buzo, calzado de seguridad y guantes de protección química específica EN 374 ABCJKL. Con esta protección, también se elimina el peligro de que esta sustancia pueda dañar la vista y su correspondiente riesgo por inhalación y contacto con la piel.



Figura 6.3. Máscara de protección obligatoria

- Se debe tener en cuenta el posible riesgo de explosión por el uso de NH_3 . Esto se puede evitar verificando continuamente los detectores de NH_3 .
- Al usar este compuesto, también existe riesgo de incendio, por lo que se han de vigilar continuamente las cámaras de la instalación para poder anticiparse a cualquier problema durante el ensayo.

A continuación, se detallará cómo se construyó y preparó la sala para el trabajo con este compuesto, y todas sus medidas de seguridad para evitar un posible accidente.

En primer lugar, se expone una ampliación de los planos de la planta baja del instituto CMT correspondiente a la zona de la instalación de la cantidad de movimiento, donde se puede apreciar los diferentes sensores de NH_3 situados en puntos estratégicos, su central de detección, y el recorrido de evacuación en caso de accidente.

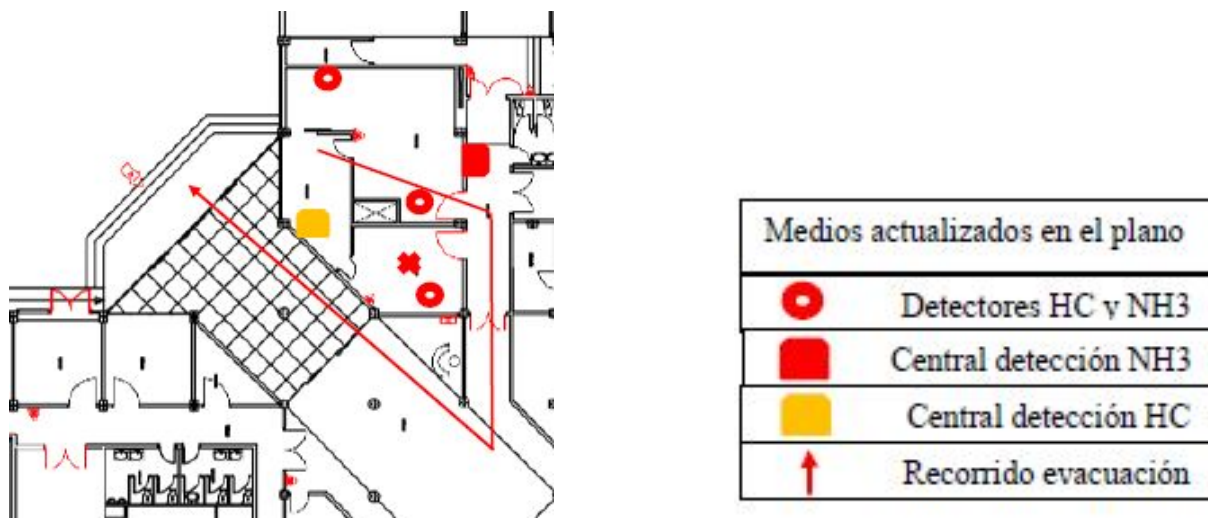


Figura 6.4. Ampliación de planos de la sala de medida de cantidad de movimiento

Por lo que en caso de accidente, se han de seguir los pasos que se expondrán en el apartado siguiente [6].

Sin embargo, estas medidas no son las únicas ya que con unos simples detectores de NH_3 no bastaría para certificar la seguridad de estos tipos de ensayos. La sala de ensayos se comporta como una caja completamente hermética al resto del edificio, es decir, se encuentra en depresión con las salas contiguas, asegurando por dos hechos que no habrá fugas en el interior del instituto. Además, para la recirculación de amoníaco, este no se expone directamente al exterior, ya que sería muy peligroso para las personas.

Para solucionar esto, el CMT dispone de un circuito de canalización del amoníaco en el que no se expone directamente al exterior, sino que se recircula hasta llegar a un depósito de agua, de manera que se mezcle con ella y reaccione según la ecuación $NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4OH$

El agua puede absorber el amoníaco y reducir la cantidad de gas tóxico y nocivo que se libera a la atmósfera, lo cuál es esencial para cumplir con las regulaciones ambientales.

Esta reacción permite neutralizar los gases tóxicos y reduce la volatilidad del amoníaco ya que al recircularlo con agua disminuye su concentración y se mitigan los posibles riesgos de liberación a la atmósfera.

El hidróxido producido sigue siendo una sustancia que requiere un manejo cuidadoso, sin embargo, en solución es menos volátil y mucho menos peligroso que el amoníaco.

Este circuito se puede ver en el siguiente plano 2D que corresponde a una ampliación de la maqueta de CdM vista en el apartado [3.1.2].

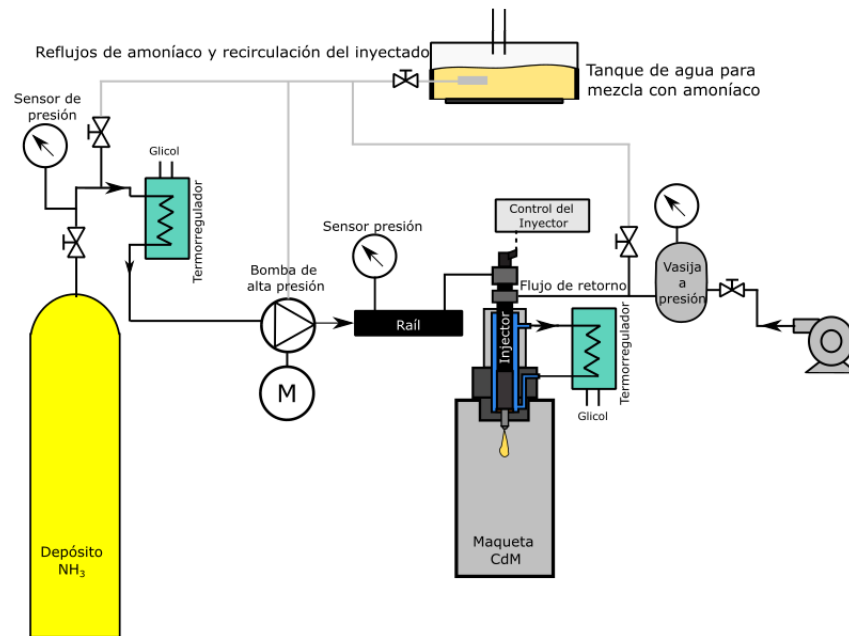


Figura 6.5. Representación 2D recirculación de NH_3 de la instalación de CdM

6. Protocolo de actuación en caso de accidente

Con todas las medidas de seguridad expuestas a lo largo del apartado anterior no debería ocurrir ningún tipo de accidente grave, aún así, existe un protocolo de actuación en caso de que esto ocurriese, es decir, que existiese un incendio o una fuga de amoníaco.

Lo primero sería parar la alimentación de combustible en toda la instalación ya que la alarma de incendios será activada automáticamente, después y si fuese posible, se debería desconectar la red eléctrica de la instalación.

Al haberse activado la alarma de incendios, todos los integrantes del CMT deberán seguir los pasos de desalojo del edificio tal y como se expone en el protocolo de actuación. No se debe tener consideración hacia bienes materiales y/o personales, al igual que no se puede infravalorar el amoníaco, en ningún caso. En lo que respecta a los técnicos en la sala de medidas, deberán alejarse de la sala según el protocolo de evacuación visto en la figura [6.4]

Una vez se llegue al lugar seguro, se dejará trabajar a las fuerzas especializadas en la seguridad del ciudadano.

Parte III

Presupuesto

1. Introducción

En este último capítulo se procede al cálculo del presupuesto del proyecto que al ser un proyecto público, ha sido financiado por el Estado. En cuanto al presupuesto distinguiremos 4 partes: coste de la instalación, coste del material utilizado no perteneciente a la instalación, coste del material fungible y el coste de la mano de obra.

Además, se ha de tener en cuenta que las salas de medida no han sido construidas para este proyecto, por lo que se obviará el coste de instalación. Por otro lado, también se excluirán del presupuesto las tuberías de combustible y demás componentes mínimos de la instalación que ya pertenecían al instituto CMT y para las que no ha sido necesaria su adquisición. El coste del resto de componentes pertenecientes a la instalación de las que ya disponía el CMT será estimado entre una relación en su precio de adquisición y el precio actual.

Todos los costes calculados a lo largo de los apartados son expuestos sin IVA, el IVA se añade conjuntamente en el resumen final [6].

2. Coste de los equipos de la instalación

A lo largo del presente apartado se expondrá el precio de cada uno de los componentes de la instalación, en función del precio de cada unidad, pudiendo obtener el precio correspondiente a cada componente y el precio total de los costes del equipo de la instalación.

En lo que respecta a las horas de utilización se ha calculado una estimación de 100 [h] para la instalación de tasa y unas 60 [h] (40 [h] en amoníaco y 20 [h] en diésel) para la instalación de cantidad de movimiento, por lo que para aquellos elementos presentes en las dos instalaciones se estiman unas 160 [h].

Debido a que los datos propuestos por el CMT presentan distintas agrupaciones con el fin de agrupar precios comunes, en este presupuesto se realizará la misma clasificación, que es la siguiente:

- Carro de la instalación de tasa: bomba, motor, líneas de presión, depósito de diésel, filtro de diésel y resto de componentes anexos.
- Conjunto del tasímetro: tasímetro, rack del tasímetro y acondicionador de la señal, además de sus respectivas conexiones.
- Equipo de la maqueta de cantidad de movimiento: maqueta CdM, amplificador de señal y rack de presión.
- Sistema de refrigeración: depósito de glicol, conductos, termorregulador y nevera.

Componente	Horas utilizado	Precio [€/h]	Importe [€]
Carro de la instalación	160	0.9	144
Equipo tasímetro	100	0.29	29
Equipo CdM	60	0.29	17.4
Sistema de refrigeración	160	0.49	78.4
Sensor de presión	160	0.3	48
Regulador de presión	160	0.3	48
PID y rack de temperaturas	160	0.74	118.4
Balanza de alta precisión	100	0.67	67
Depósito de diésel	120	0.04	4.8
Osciloscopio y software YOKO	160	1.04	166.4
Depósito amoníaco	40	0.13	5.2
Filtro separador	60	0.2	12
Ordenadores	160	0.17	27.2
Impresora	10	0.04	4
Rail	160	0.37	59.2
Genotec	160	0.44	70.4
Inyectores	160	0.72	115.2
ICU	160	0.11	17.60
Precio total			1032.2

Tabla 2.1: Coste de los equipos

En lo que respecta al cálculo del coste de los equipos se tendrá en cuenta la amortización y el mantenimiento de cada uno de ellos.

La amortización de este presupuesto conforma el proceso de distribuir el coste del componente a lo largo de su vida útil, su cálculo se realiza con la fórmula [6.2] La tasa horaria se define como el coste por hora de trabajo y se calcula según la ecuación [6.3].

$$a = \frac{V_c - V_r}{n} \quad (6.2)$$

$$T_h = \frac{a + m}{h} \quad (6.3)$$

Siendo h el número de horas trabajadas al año, que serán aproximadas mediante 8 horas laborables durante los 221 días laborables del año, sumando un total de 1792 [horas/año].

Componente	V_c [€/h]	V_r [€/h]	n [años]	a[€/año]	m[€/año]	T_h [€/h]
Carro de la instalación	9300	2100	5	1440	180	0.904
Equipo tasímetro	40000	29800	5	2040	30	1.155
Equipo CdM	15025	10084	5	988.2	50	0.579
Sistema de refrigeración	3218	800	3	806	78	0.493
Sensor de presión	3017	2500	1	517	20	0.3
Regulador de presión	2845	2250	1	625	20	0.36
PID y rack de temperaturas	1802	500	1	1302	20	0.738
Balanza de alta precisión	1804	600	1	1204	10	0.677
Depósito de diésel	35	28	1	7	10	0.009
Osciloscopio y software YOKO	12020	10217	1	1803	60	1.04
Depósito amoníaco	225	220	1	5	0	0.003
Filtro separador	350	0	1	350	0	0.195
Ordenadores	1803	0.202	2	300.5	12	0.174
Impresora	180	120	2	30	36	0.037
Raíl	1400	1160	3	80	15	0.053
Genotec	12000	8000	2	2000	20	1.127
Inyectores	500	375	3	41.667	50	0.051
ICU	600	480	1	120	5	0.07

Tabla 2.2: Cálculo de amortización y tasa horaria

3. Coste materiales no pertenecientes a la instalación

En el presente apartado se expone el coste de aquellos materiales que no pertenecen a la instalación del instituto de investigación.

Componente	Cantidad [ud]	Precio [€/ud]	Importe [€]
Tóricas	40	0.25	10
Tornillos varios	120	0.4	48
Cable coaxial [m]	30	0.60	18
Arandelas varias	140	0.65	91
Regletas	40	0.25	10
Abrazaderas	40	0.25	10
Precio total			187 €

Tabla 3.1: Coste del material no perteneciente a la instalación

4. Coste del material fungible

A lo largo del presente apartado se expone igualmente el coste de los materiales fungibles, en la tabla [5.1] se muestran los más importantes.

Para el cálculo de la electricidad y el agua consumida se ha realizado una aproximación teniendo en cuenta el consumo de los principales componentes y con una estimación de los días de trabajo que son 24, 6 horas de trabajo por día.

Componente	Unidad	Cantidad [ud]	Precio [€/ud]	Importe [€]
Diésel	[l]	10	1.45	14.5
Amoníaco	[kg]	0.5	5	2.5
Electricidad	[kWh]	1800	0.19	342
Agua	[m ³]	0.08	1.92	0.15
Nitrógeno	[ud]	1	65	65
Precio total				424.15 €

Tabla 4.1: Coste del material no perteneciente a la instalación

5. Coste de personal

Para realizar el cálculo de la mano de obra de cada uno de los participantes del proyecto (ingeniero aeroespacial junior, ingeniero mecánico, técnico de laboratorio y doctora en ingeniería mecánica) se sigue el siguiente procedimiento para diferentes sueldos de trabajo.

A continuación, se detalla el calculo de coste por hora de un ingeniero técnico junior, el resto de costes de mano de obra han sido calculados de manera similar.

- Las horas trabajadas al año se corresponden con el número de días laborables al año: 221 [días].
- Salario anual medio de un ingeniero: 34300 [€/año]
- 36 % seguridad social:12348
- Salario medio bruto anual: 46648 [€/año]
- **Coste por hora medio del ingeniero: 26.03 [€/año]**

Por lo que agrupando a los 4 trabajadores del proyecto se tiene el siguiente coste de personal:

Trabajador	Cantidad [h]	Precio[€/h]	Importe [€]
Ingeniero aeroespacial junior	300	26.03	7809
Ingeniero mecánico	120	29.44	3532.8
Técnico de laboratorio	120	32.20	3864
Doctora en Ingeniería mecánica	90	38.75	3487.5
Precio total			18693.3€

Tabla 5.1: Coste del material no perteneciente a la instalación

6. Resumen

Coste	Importe [€]
Equipos de la instalación	1032.20
Materiales no pertenecientes a la instalación	187.00
Material fungible	424.15
Mano de obra	18693.30
Total sin IVA	20336.65
IVA (21 %)	4270.70
Total con IVA	24607.35

Tabla 6.1: Resumen final del presupuesto

El presupuesto final del proyecto es de **VEINTICUATRO MIL SEISCIENTOS SIETE EUROS CON TREINTA Y CINCO CÉNTIMOS.**