



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Modelado unidimensional de un motor de combustión
interna de automoción alimentado con amoniaco.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

AUTOR/A: Sanz Alcayde, Mar

Tutor/a: Lujan Martinez, José Manuel

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



TRABAJO FIN DE GRADO

Modelado unidimensional de un motor de combustión interna de automoción alimentado con amoniaco

Para la obtención del Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales



Presentado por: Mar Sanz Alcayde
Tutor: José Manuel Luján Martínez

Septiembre 2023, Valencia

Resumen

La descarbonización en el sector del transporte es una prioridad global para combatir el cambio climático. La investigación sobre combustibles alternativos en motores de combustión interna se ha destacado como una solución prometedora para reducir las emisiones de CO₂. Siguiendo esta línea de investigación, este Trabajo de Fin de Grado está enfocado en estudiar el comportamiento de motor convencional de automoción de encendido por compresión de 2 Litros de cilindrada que ha sido acondicionado para operar con amoniaco como combustible. Así pues, el objetivo principal de este trabajo es explorar y analizar la viabilidad de utilizar amoniaco como combustible en un motor diésel turboalimentado en el cual se modificarán algunas partes de dicho motor para operar con este combustible, como: la culata, a fin de introducir las bujías en la cámara de combustión; los pistones, para aumentar la relación de compresión; y el colector de admisión, donde se instalarán los inyectores de amoniaco en estado gaseoso.

Para lograr este objetivo, se ha construido un modelo unidimensional del motor completo con el software comercial GT-Power y se ha calibrado dicho modelo usando ensayos experimentales en los que el motor fue alimentado con diésel. Una vez calibrado, el modelo fue utilizado para realizar simulaciones predictivas con amoniaco, mediante las cuales, se evaluó el comportamiento global del motor con especial atención en el funcionamiento del turbocompresor. Tras este modelado preliminar del motor con amoniaco, se observó que, con la turbomáquina empleada, no es posible reproducir la curva de plena carga del motor diésel usando amoniaco como combustible; ya que el compresor trabajaría en bombeo.

Abstract

Decarbonization in the transportation sector is a global priority to combat climate change. Research on alternative fuels in internal combustion engines has been highlighted as a promising solution to reduce CO₂ emissions. Following this line of research, this Final Degree Project is focused on studying the behavior of a conventional 2L compression ignition automotive engine that has been conditioned to operate with ammonia. Thus, the main objective of this work is to explore and analyze the feasibility of using ammonia as fuel in a turbocharged diesel engine in which some parts of the engine will be modified to operate with ammonia, such as: the cylinder head, in order to introduce the spark plugs in the combustion chamber; the pistons, to increase the compression ratio; and the intake manifold, where the ammonia injectors will be installed.

To achieve this objective, a one-dimensional model of the complete engine was built with the commercial software GT-Power and the model was calibrated using experimental tests in which the engine was fed with diesel. Once calibrated, the model was used to perform predictive simulations with ammonia, by which the overall engine behavior was evaluated with special attention to the turbocharger performance. After this preliminary modeling of the engine with ammonia, it was observed that, with the turbocharger used, it is not possible to reproduce the full-load curve of the diesel engine using ammonia as fuel, given that the compressor would operate in surge.

Resum

La descarbonització en el sector del transport és una prioritat global per a combatre el canvi climàtic. La investigació sobre combustibles alternatius en motors de combustió interna s'ha destacat com una solució prometedora per a reduir les emissions de CO₂. Seguint aquesta línia d'investigació, aquest Treball de Fi de Grau està enfocat a estudiar el comportament de motor convencional d'automoció d'encesa per compressió de 2L que ha sigut condicionat per a operar amb amoníac. Així doncs, l'objectiu principal d'aquest treball és explorar i analitzar la viabilitat d'utilitzar amoníac com a combustible en un motor dièsel turboalimentado en el qual es modificaran algunes parts d'aquest motor per a operar amb amoníac, com: la culata, a fi d'introduir les bugies en la cambra de combustió; els pistons, per a augmentar la relació de compressió; i el col·lector d'admissió, on s'instal·laran els injectors d'amoníac.

Per a aconseguir aquest objectiu, s'ha construït un model unidimensional del motor complet amb el programari comercial GT-Power i s'ha calibrat aquest model usant assajos experimentals en els quals el motor va ser alimentat amb dièsel. Una vegada calibrat, el model va ser utilitzat per a realitzar simulacions predictives amb amoníac, mitjançant les quals, es va avaluar el comportament global del motor amb especial atenció en el funcionament del turbocompressor. Després d'aquest modelatge preliminar del motor amb amoníac, es va observar que, amb la turbomaquina empleada, no és possible reproduir la corba de plena càrrega del motor dièsel usant amoníac com a combustible; ja que el compressor treballaria en bombament.

Nomenclatura

CO: Monóxido de carbono

CO₂: Dióxido de carbono

EGR: Recirculación de gases de escape

FM: Multiplicador de fricción

HTM: Multiplicador de transmisión de calor

MCIA: Motor de combustión interna alternativo

MEC: Motor de encendido por compresión

MEP: Motor de encendido provocado

NO_x: Óxidos de nitrógeno (NO y NO₂)

PMS: Punto muerto superior

TGV: Turbina de Geometría Variable

WCAC (Water Charge Air Cooler): Enfriador de aire por agua

Contenido

CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN	18
1.1 Situación actual y justificación	18
1.2 Objetivos y metodología.....	19
1.3 Estructura	19
CAPÍTULO 2 – REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1. Motores térmicos	21
2.2 Motores de encendido por compresión (MEC)	23
2.3 Estado actual de la tecnología en motores de encendido por compresión.....	25
2.4 Uso del amoníaco en medios de transporte	27
CAPÍTULO 3 – HERRAMIENTAS	29
3.1. Instalación experimental.....	29
3.2. Modelo 1D del motor	34
CAPÍTULO 4 – METODOLOGÍA	40
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS	43
5.1 VALIDACIÓN DEL MODELO	43
5.2 COMPARATIVA DIÉSEL VS AMONIACO	47
CAPÍTULO 6 – RESUMEN Y CONCLUSIONES	54
CAPÍTULO 7 – PRESUPUESTO	57
7.1. Desglose de costes de equipos y sistemas informáticos	57
7.2. Desglose de costes de personal.....	58
7.3 Presupuesto de la parte experimental	59
7.4 Presupuesto de la parte computacional.....	59
7.5 Presupuesto total.....	60
CAPÍTULO 8 - INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL PLIEGO DE CONDICIONES ..	63
CAPÍTULO 9 - PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES	63
9.1 Condiciones del área experimental.....	63
9.2 Condiciones del puesto de trabajo	64
CAPÍTULO 10 - PLIEGO DE CONDICIONES PARTICULARES	65
10.1 Puesta en marcha, apagado y mantenimiento.....	65
10.2 Equipos informáticos.....	65
CAPÍTULO 11 - BIBLIOGRAFÍA	66

Índice de ilustraciones

1. Figura 2.1: Esquema de clasificación de motores	21
2. Figura 2.2: Esquema de motor rotativo o Wankel	22
3. Figura 2.3: Ciclo motor diésel (4 tiempos).....	24
4. Figura 2.4: Esquema del sistema de sobrealimentación (turbocompresor) en motores MEC	26
5. Figura 3.1: Esquema general de la instalación experimental	30
6. Figura 3.2: Esquema unifilar del sistema de admisión con medidas (en mm). Los conductos que están pintados de azul son de aluminio y los que están pintados de naranja son de plástico.	31
7. Figura 3.3: Válvula mariposa del motor diésel.....	32
8. Figura 3.4: Esquema unifilar del sistema de escape con medidas (en mm). Los conductos que están pintados en rosa son de hierro fundido.....	32
9. Figura 3.5: Imagen del sistema de admisión del motor de encendido por compresión instalado en el banco de ensayos.	33
10. Figura 3.6: Imagen del sistema de escape del motor de encendido por compresión instalado en el banco de ensayos.	33
11. Figura 3.7: Ejemplo de configuración de un objeto (colector de admisión)	34
12. Figura 3.8: Medidas filtro de aire en GT-Power.....	35
13. Figura 3.9: Esquema de las medidas del pistón.....	35
14. Figura 3.10: Esquema de las válvulas de admisión y escape	36
15. Figura 3.11: Curva característica de las válvulas de admisión.....	37
16. Figura 3.12: Perfil de levantamiento de las válvulas de escape	37
17. Figura 3.13: Esquema del cilindro.....	38
18. Figura 3.14: Mapa del compresor.....	39
19. Figura 4.1: Correlación pérdida de carga en la línea de escape	41
20. Figura 5.1. Modelo vs experimental: temperatura en el colector de admisión.....	43
21. Figura 5.2. Modelo vs experimental: temperatura en el colector de escape.....	44
22. Figura 5.3. Modelo vs experimental: presión en el colector de admisión.....	44
23. Figura 5.4. Modelo vs experimental: presión en el colector de escape.....	44
24. Figura 5.5. Modelo vs experimental: combustible	45
25. Figura 5.6. Modelo vs experimental: par del motor	45
26. Figura 5.7. Modelo vs experimental: gasto de aire del motor	46
27. Figura 5.8. Amoníaco vs diésel: gasto másico a través de las válvulas de admisión.....	47
28. Figura 5.9. Amoníaco vs diésel: presión en el colector de admisión.....	47
29. Figura 5.10: Ecuación densidad	48
30. Figura 5.11. Amoníaco vs diésel: combustible.....	48
31. Figura 5.12. Amoníaco vs diésel: gasto másico de aire.....	49
32. Figura 5.13. Amoníaco vs diésel: par del motor.....	49
33. Figura 5.14. Diésel vs amoniaco: temperatura a la salida del compresor	50
34. Figura 5.15. Mapa del compresor: puntos de operación con diésel	51
35. Figura 5.16. Mapa del compresor: puntos de operación con amoniaco	51
36. Figura 5.17: Mapa del compresor con los nuevos puntos de operación con amoniaco	52

37. Figura 5.18. Par del motor: diésel vs amoniaco tras recalculer los casos con amoniaco para evitar bombeo en el compresor.....	52
38. Figura 5.19. Temperatura a la salida del compresor: diésel vs amoniaco tras recalculer los casos con amoniaco para evitar bombeo en el compresor	53

Índice de tablas

1. Tabla 3.1: Características del motor base.	29
2. Tabla 4.1: Tabla de datos experimentales con diésel	40
3. Tabla 5.1: Errores de modelado	46
4. Tabla 7.1: Coste de equipos del banco de ensayos	58
5. Tabla 7.2: Coste de equipos informáticos y licencias.....	58
6. Tabla 7.3: Coste de personal.....	59
7. Tabla 7.4: Presupuesto de la parte experimental del proyecto.....	59
8. Tabla 7.5: Presupuesto de la parte computacional del proyecto.....	60
9. Tabla 7.6: Presupuesto de ejecución material del proyecto.....	60
10. Tabla 7.7: Presupuesto total del proyecto	61

I MEMORIA

CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN

Contenido

- 1.1 Situación actual y justificación
 - 1.2 Objetivos y metodología
 - 1.3 Estructura del documento
-

1.1 Situación actual y justificación

En la actualidad los fabricantes de automóviles y otras industrias continúan mejorando la eficiencia y el rendimiento de los motores de combustión interna alternativos. En las últimas décadas, se han implementado avances en tecnología, como el downsizing (reducción de la cilindrada del motor), los sistemas de distribución variable, o la inyección directa de combustible en motores de encendido provocado; para así lograr una mayor eficiencia y reducir las emisiones contaminantes. Además, las regulaciones ambientales cada vez son más estrictas y la conciencia ambiental mayor, de ahí que en los últimos años se hayan desarrollado sistemas de propulsión alternativos, como por ejemplo es el caso de los vehículos eléctricos y los híbridos.

Sin embargo, los motores de combustión interna alternativos seguirán siendo utilizados en las próximas décadas. Para ello, los fabricantes están introduciendo cambios y mejoras significativas para adaptarse a las regulaciones actuales. Una parte importante de la investigación en motores de combustión está actualmente enfocada en estudiar el uso de combustibles alternativos, como los biocombustibles, el hidrógeno o el amoníaco. En el presente Trabajo Fin de Grado, se analiza la viabilidad de utilizar amoníaco como combustible en un motor de encendido por compresión con leves modificaciones.

El amoníaco tiene beneficios ambientales ya que no tiene carbono y es posible producirlo utilizando fuentes de energía renovables (Rozo Mendieta y Hernández Corredor, 2023). Por tanto, los motores de amoníaco tienen el potencial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir a la transición hacia una movilidad más sostenible. Aunque el amoníaco tiene ventajas, también tiene algunas desventajas. El amoníaco tiene propiedades corrosivas y puede requerir modificaciones en los motores convencionales para poder utilizarlo como combustible de manera segura y eficiente. Además, es necesario desarrollar sistemas de almacenamiento y distribución adecuados para el amoníaco.

Actualmente, los motores de amoníaco se están considerando principalmente para las aplicaciones industriales y estacionarias, como generadores de energía o motores para aplicaciones específicas. Aunque se han logrado avances significativos, aún se necesita más investigación y desarrollo para mejorar la eficiencia y la viabilidad económica de estos motores. Los motores de amoníaco son un campo de investigación en evolución con el potencial de ofrecer una alternativa más limpia y sostenible a los motores de combustión interna convencionales. A medida que la tecnología y la infraestructura

continúen desarrollándose, podrían desempeñar un papel importante en la transición hacia una movilidad más limpia y un sistema energético más sostenible (Almudí Coello, 2022).

1.2 Objetivos y metodología.

A fin de contribuir a la descarbonización del sector del transporte, este Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo principal explorar y analizar la viabilidad de utilizar amoniaco como combustible en un motor de encendido por compresión (diésel) de 2 Litros de cilindrada turboalimentado. Para poder inyectar y quemar el amoniaco, se modificarán algunas partes de dicho motor: la culata, a fin de introducir las bujías en la cámara de combustión; los pistones, para aumentar la relación de compresión; y el colector de admisión, donde se instalarán los inyectores de amoniaco.

Para lograr el objetivo de este trabajo, se ha construido un modelo unidimensional (1D) del motor, el cual ha sido calibrado usando ensayos experimentales con diésel. Una vez calibrado, se ha utilizado el modelo 1D para evaluar las prestaciones del motor con amoniaco. En el Capítulo 4, se proporciona una descripción más detallada de la metodología seguida en este Trabajo Fin de Grado.

1.3 Estructura

Este trabajo consta de tres partes principales siguiendo la normativa establecida por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Cada una de estas tres partes están a su vez divididas en capítulos, secciones y subsecciones, y se relatan a continuación.

1. Memoria: es el documento principal del presente Trabajo, donde se encuentran las explicaciones de todas las herramientas utilizadas, los procedimientos seguidos y, tras esto, los resultados y conclusiones obtenidos. Los capítulos que lo forman son los siguientes:
 - a. Planteamiento del proyecto, donde se introduce el tema a tratar y los objetivos buscados.
 - b. Revisión bibliográfica, marco teórico necesario para una correcta comprensión de todo lo realizado posteriormente.
 - c. Herramientas, definición de todas las herramientas utilizadas, ya sean teóricas o experimentales.
 - d. Metodología, en esta parte se trata como se han utilizado las herramientas y todos los procedimientos seguidos para obtener los resultados.
 - e. Resultados.
 - f. Conclusiones.
2. Presupuesto: es el documento donde se enumeran los costes asociados a todo el proceso seguido en el proyecto, siendo incluidos materiales, tanto físicos como programas informáticos que necesitan del pago de licencias, recursos y personal.

3. Pliego de condiciones: es el documento donde se realiza la regulación del proyecto a partir de las directrices de esta normativa. Se tratan las condiciones tanto del área experimental como del puesto de trabajo del personal para asegurar un correcto desarrollo del proyecto.
- Introducción y objeto del pliego de condiciones.
 - Pliego de condiciones generales, en este capítulo se especifican las condiciones del área experimental y el puesto de trabajo.
 - Pliego de condiciones particulares, se relata la utilización de los equipos disponibles, tanto del banco motor como informáticos.

CAPÍTULO 2 – REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

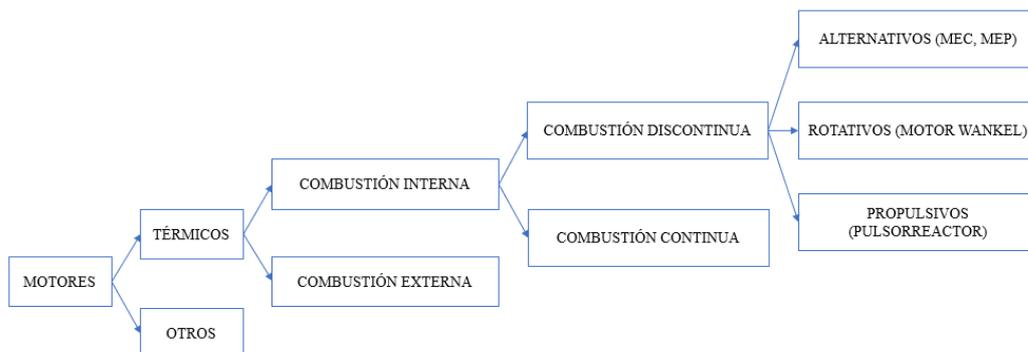
Contenido

- 2.1. Motores térmicos
 - 2.2. Motores de encendido por compresión (MEC)
 - 2.3. Estado actual de la tecnología y emisiones contaminantes en motores de encendido por compresión
 - 2.4. Uso amoníaco como medio de transporte
-

2.1. Motores térmicos

En primer lugar, se define que es un motor. Según la RAE (Real Academia Española) un motor *es una máquina destinada a producir movimiento a expensas de otra fuente de energía*. Dentro de este amplio campo, se encuentra el motor térmico, que se puede definir como el dispositivo que permite obtener energía mecánica a partir de la energía térmica contenida en un fluido compresible. Cabe la posibilidad de poder disponer directamente de esa energía, como es el caso de la energía geotérmica o la radiación solar, también es posible obtenerla a partir de otros tipos de energía como puede ser la energía química almacenada en la materia. En este último caso se necesitará transformar esa energía química en energía térmica mediante un proceso adicional, como puede ser un proceso de combustión. Se necesitará además disponer de un fluido de trabajo que es capaz de variar su energía a partir de la energía térmica y de los elementos mecánicos adecuados para que el fluido pueda transformar su energía en energía mecánica.

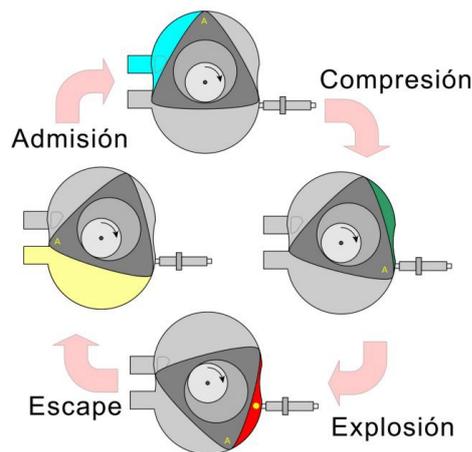
Dentro de los motores térmicos se pueden diferenciar dos tipos, según la forma en la que se dota la energía al fluido de trabajo. Por una parte, en los motores de combustión interna, es el propio fluido de trabajo el que genera la energía mediante un proceso de combustión dentro de las cámaras del propio motor. Por otra parte, se encuentran los motores de combustión externa cuyo proceso de combustión tiene lugar fuera de la máquina para calentar el fluido de trabajo mediante un proceso de transferencia de calor, como por ejemplo los motores Stirling (Prof. F. Payri y Prof. J. M. Desantes, 2011).



1. Figura 2.1: Esquema de clasificación de motores

Los motores de combustión interna pueden dividirse en dos subgrupos teniendo en cuenta si la combustión es continua o discontinua. Continua supone que el fluido pasa de manera ininterrumpida través del motor, por lo que la combustión ocurre de manera constante como es el caso de las turbinas de gas. Discontinua la combustión es intermitente, como ocurre en los motores de flujo pulsante o motores de combustión interna alternativos.

La energía obtenida mediante la combustión se manifiesta inicialmente como energía térmica, y posteriormente se convierte en energía mecánica al realizar trabajo sobre una superficie móvil. Según el movimiento de esta superficie se distinguen dos tipos de motores. Motores rotativos o motor Wankel, es un motor que funciona gracias a unos rotores en lugar de los cilindros y pistones convencionales. La cámara de combustión de este tipo de motores está formada por el estator y también por uno de los lados del rotor, que tiene forma triangular. Los tres vértices del mencionado triángulo que forma el rotor están en permanente contacto con el estator. De esta forma nos encontramos con tres compartimentos donde se realiza un ciclo en cada uno de ellos. Mientras el rotor gira en el interior del motor Wankel cada una de las tres partes se va comprimiendo o expandiendo de forma alternativa, y este movimiento es lo que hace que funcione el motor Wankel (Prof. F. Payri y Prof. J. M. Desantes, 2011).



2. Figura 2.2: Esquema de motor rotativo o Wankel

Los motores de combustión interna alternativos son aquellos en los que mediante un mecanismo de biela-manivela convierten la rotación de un árbol de levas en el movimiento rectilíneo de un pistón, que sube y baja dentro de un cilindro, aquí es donde ocurre el ciclo de funcionamiento.

Teniendo en cuenta que el objetivo de este trabajo es el motor de combustión interna alternativos (MCIA) no se hará referencia al resto de motores. Aunque estos motores se pueden clasificar de diversas formas, los MCIA se suelen clasificar en motores de encendido provocado (MEP) y motores de encendido por compresión (MEC), según el proceso de combustión.

Los motores de encendido provocado (MEP), la característica fundamental de este motor es que el inicio de la combustión se produce mediante un aporte de energía externo al ciclo termodinámico, que en motores modernos se consigue al saltar una chispa entre los dos electrodos de una bujía.

Los motores de encendido por compresión (MEC), la combustión se inicia mediante un proceso de autoencendido de la mezcla de aire y combustible al conseguirse temperaturas suficientemente altas en la cámara de combustión debido al proceso de compresión. Para controlar de modo aproximado el instante de encendido, durante el proceso de admisión se introduce solamente aire y el combustible se inyecta hacia el final de la carrera de compresión, cuando el aire alcanza niveles de temperatura altos para producir el autoencendido.

El modelo de motor de trabajo que se ha utilizado ha sido un motor de encendido por compresión por lo que la explicación se va a centra en este tipo de motores (Prof. F. Payri y Prof. J. M. Desantes, 2011).

2.2 Motores de encendido por compresión (MEC)

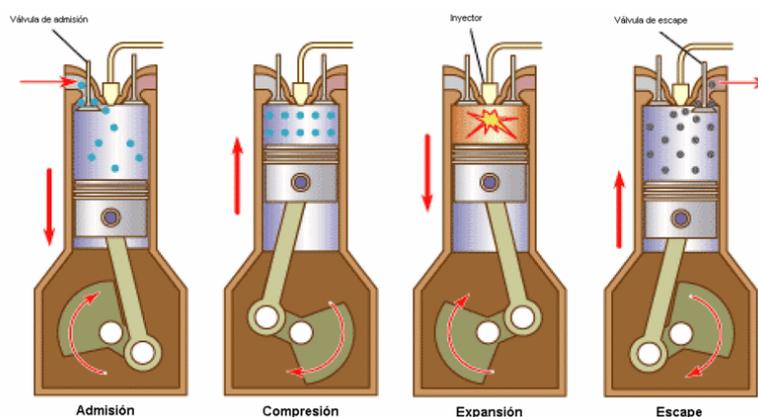
En el motor de encendido por compresión la mezcla aire-combustible que se forma a alta temperatura es inestable químicamente, con lo cual tiene facilidad para el autoencendido en un tiempo corto, de hasta 2 milisegundos, en las condiciones usuales de funcionamiento del motor. En un MEC, la evaporación y la mezcla han de ocurrir dentro del cilindro en un corto periodo de tiempo en las cercanías del punto muerto superior (PMS).

A continuación, se definen las fases de la combustión indicando los procesos que ocurren dentro de cada una de ellas.

- Fase de retraso al autoencendido, en esta fase comienza el proceso de inyección, cuando el chorro líquido es inyectado en el interior de la cámara de combustión y culmina en el autoencendido espontáneo de la mezcla que marca el final de esta fase de combustión premezclada. En ella, influyen tanto procesos físicos como químicos. En cuanto a los procesos físicos, el chorro se enfrenta a un ambiente de elevada densidad, comenzando a desintegrarse en gotas de pequeño tamaño que aumentan la interfase aire-combustible. Por otra parte, la cantidad de movimiento del chorro inyectado hace que el aire sea arrastrado hacia el interior de este, constituyendo otro de los fenómenos claves en el proceso de mezcla. Ambos fenómenos, atomización y englobamiento de aire, hacen que el combustible líquido aumente de temperatura por el contacto con el aire más caliente y comience a evaporarse. Una vez evaporado, el englobamiento inducido por la calidad de movimiento del chorro sigue mezclando combustible y aire. La parte química del proceso de autoencendido comienza cuando aparece el combustible evaporado. Para combustibles de tipo Diesel convencional, la química del autoencendido consta a su vez de dos fases. La primera ocurre a baja temperatura y es poco exotérmica, de manera que no suele detectarse liberación de calor a partir de la medida de presión en el cilindro y su análisis se incluye en la presente fase de retraso al autoencendido. La segunda es muy exotérmica, y su aparición marca el inicio de la siguiente fase de combustión premezclada. Con las reacciones a baja temperatura empieza el proceso de oxidación del combustible mediante la

producción de radicales químicos. Este proceso de oxidación depende de la temperatura en cámara y del tipo de combustible que se caracteriza por el denominado número de cetano que cuantifica la facilidad para el autoencendido del combustible. Este parámetro es alto si el combustible tiene gran facilidad para autoencenderse.

- La fase de combustión premezclada está caracterizada por tres fenómenos básicos, en primer lugar, la cinética química del autoencendido entra en una fase de alta temperatura con lo que la tasa de consumo de combustible crece de manera muy elevada y como consecuencia trae una elevada tasa de liberación de calor. El segundo fenómeno consiste en la aparición de hollín incandescente en la zona frontal del chorro que se debe por el consumo del combustible y da lugar a una llama amarilla-anaranjada. En el tercer lugar, se produce el establecimiento del frente de llama por difusión, acentúa el carácter transitorio de la fase, que es un enlace entre el chorro no reactivo y la llama de difusión.
- Fase de combustión por difusión, tras el encendido del chorro, el proceso de combustión entra en la fase de difusión, en el cual el frente de llama se consolida. La ley de liberación de calor viene controlada principalmente por la mezcla del combustible evaporado con el aire en el interior de la cámara. Cuanto más rápida sea la mezcla más intensa es la liberación de calor. Mientras dura la inyección, el proceso de mezcla está controlado por la cantidad de movimiento que introduce el chorro en la cámara. La estructura de llama alcanza un periodo de estabilidad que se mantiene hasta el final del proceso de inyección, momento en el cual cesa el aporte de cantidad de movimiento del chorro para el proceso de mezcla. A partir de aquí, la tasa de combustión cae y el fenómeno de oxidación está controlado por la turbulencia que queda en la cámara de combustión, bien gracias al movimiento del aire o al movimiento residual del chorro, hasta que se consume el combustible presente en la cámara (Prof. F. Payri y Prof. J. M. Desantes, 2011).



3. Figura 2.3: Ciclo motor diésel (4 tiempos)

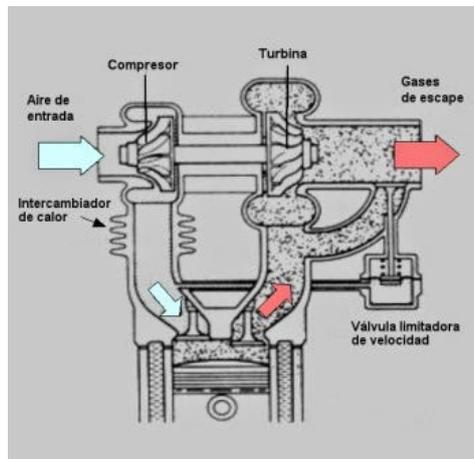
2.3 Estado actual de la tecnología en motores de encendido por compresión

En la actualidad, los motores de encendido por compresión, también conocidos como motores diésel, han experimentado avances tecnológicos significativos para mejorar su rendimiento, eficiencia y reducir las emisiones.

Las tecnologías utilizadas en estos motores son:

- Inyección directa de combustible, ha evolucionado para permitir una mejor atomización y distribución del combustible en la cámara de combustión. Esto se logra mediante sistemas de inyección de alta presión, que utilizan inyectores piezoeléctricos o magnéticos controlados electrónicamente para pulverizar el combustible en pequeñas partículas. Esto mejora la eficiencia de combustión y reduce las emisiones (Villamar y otros, 2009).
- Sistemas de gestión electrónica del motor, los motores diésel modernos utilizan sensores para monitorear constantemente parámetros como la temperatura del motor, la presión de admisión y la carga. La información recopilada se utiliza para ajustar la cantidad de combustible inyectado, el tiempo de inyección y la presión de sobrealimentación, optimizando así el rendimiento y la eficiencia (Villamar y otros, 2009).
- Turbocompresores de geometría variable, se utilizan ampliamente en motores diésel modernos, estos turbos ajustan automáticamente la geometría de los álabes del estátor para controlar la presión de sobrealimentación en función de las demandas del motor. Esto proporciona una mejor respuesta del acelerador en todo el rango de revoluciones y optimiza la eficiencia del motor (Villamar y otros, 2009).
- Tratamiento de gases de escape, para cumplir con los estándares de emisiones cada vez más estrictos, los motores diésel utilizan sistemas de tratamiento de gases de escape, como los catalizadores de oxidación y los filtros de partículas diésel (DPF). Estos componentes reducen las emisiones de gases contaminantes, como el monóxido de carbono, los hidrocarburos sin quemar y las partículas de hollín (Villamar y otros, 2009).
- Sistemas de recirculación de gases de escape (EGR), se utilizan para reducir las emisiones de NOx en los motores diésel. Estos sistemas recirculan una porción de los gases de escape a la admisión, lo que disminuye la temperatura de combustión y reduce la formación de NOx (Villamar y otros, 2009).
- Control de la post-inyección, es una inyección adicional de combustible después de la inyección principal para mejorar el funcionamiento de los sistemas de postratamiento (Villamar y otros, 2009).
- Sobrealimentación, consiste en comprimir el aire de admisión antes de que entre en la cámara de combustión, lo que aumenta la densidad del aire y permite mayor cantidad de oxígeno en la mezcla de combustible. La forma más común de sobrealimentación en los motores MEC es el turbocompresor, que utiliza la energía de los gases de escape para accionar una turbina que a su vez hace girar un compresor, donde se comprime el aire de admisión. Al comprimir el aire se

aumenta la cantidad de oxígeno disponible para la combustión, lo que permite introducir más combustible, y por tanto entregar más potencia (Martínez, 1998).



4. Figura 2.4: Esquema del sistema de sobrealimentación (turbocompresor) en motores MEC

Los motores de encendido por compresión emiten una serie de contaminantes, a continuación, se mencionan las principales emisiones contaminantes asociadas al motor diésel.

- Óxidos de nitrógeno (NO_x), son gases contaminantes que contribuyen a la formación de smog y la lluvia ácida. Se generan durante la combustión a altas temperaturas en presencia de nitrógeno y oxígeno. Los motores MEC tienden a emitir mayores cantidades de NO_x en comparación con los motores de encendido provocado, aunque las tecnologías modernas como los sistemas de recirculación de gases de escape (EGR) y los catalizadores selectivos de reducción de NO_x (SCR) ayudan a reducir estas emisiones.
- Partículas de hollín, son pequeñas partículas sólidas de carbono y otros compuestos orgánicos. Estas partículas pueden contribuir a la contaminación del aire y a problemas respiratorios. Los filtros de partículas diésel (DPF) se utilizan para atrapar y eliminar la mayoría de las partículas de hollín antes de que se liberen al ambiente.
- Hidrocarburos no quemados, son compuestos orgánicos volátiles (VOC) que pueden contribuir a la formación de smog. Estas emisiones se producen cuando el combustible no se quema por completo durante el proceso de combustión. Los avances en la inyección del combustible y en la gestión electrónica del motor han ayudado a reducir las emisiones de hidrocarburos no quemados en los motores diésel modernos.
- Monóxido de carbono (CO), es un gas incoloro e inodoro que se produce cuando el combustible no se quema completamente. Los sistemas de gestión electrónica del motor, junto con el catalizador de oxidación, ayudan a controlar y minimizar las emisiones de CO.

Es importante destacar que, debido a la implementación de exigentes normativas anticontaminantes en los últimos años, los fabricantes de motores MEC están trabajando

constantemente en el desarrollo de tecnologías más limpias y eficientes para reducir las emisiones de dichos motores (Basté González, 2013).

2.4 Uso del amoníaco en medios de transporte

El amoníaco (NH_3) se ha considerado como una posible alternativa para reducir las emisiones de CO_2 en los medios de transporte. Aunque aún se encuentra en etapas de investigación y desarrollo, se están explotando diversas aplicaciones del amoníaco en este contexto. A continuación, se mencionan algunos usos potenciales del amoníaco en los medios de transporte:

- Combustible de amoníaco, una de las posibilidades más estudiadas es utilizar el NH_3 como combustible en lugar de los combustibles fósiles convencionales, como la gasolina o el diésel. El amoníaco puede ser quemado en motores de combustión interna tradicionales con algunas modificaciones en el diseño y ajustes en la gestión electrónica del motor. Al quemarse, el amoníaco libera energía y emite principalmente vapor de agua y nitrógeno, por lo que no se emiten gases de efecto invernadero.
- Almacenamiento de hidrógeno. El amoníaco también puede ser utilizado como un medio para almacenar y transportar hidrógeno. El hidrógeno tiene una muy alta densidad energética, pero su almacenamiento y distribución pueden ser complicados debido a problemas de volumen, presión y seguridad. El amoníaco, por otro lado, es más fácil de manejar y almacenar en comparación con el hidrógeno gaseoso. El proceso de almacenamiento implica producir amoníaco a partir de hidrógeno y nitrógeno a través de un proceso llamado síntesis de amoníaco. El hidrógeno utilizado en esta síntesis puede obtenerse a partir de diversas fuentes como energía renovable, gas natural o incluso producido a través de la electrólisis del agua.
- AdBlue, una solución de urea (la cual se transforma en amoníaco al mezclarse con los gases de escape) en agua. Se utiliza actualmente en algunos vehículos diésel como agente reductor de sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR). El AdBlue se inyecta en el sistema de escape y reacciona con los óxidos de nitrógeno (NO_x), convirtiéndolos en nitrógeno y agua. Esto ayuda a reducir las emisiones de NO_x y a cumplir con los estándares de emisiones.

Es importante destacar que la implementación generalizada del amoníaco en los medios de transporte aún enfrenta desafíos técnicos y logísticos, como la infraestructura de suministro, el almacenamiento seguro y la eficiencia energética. Además, el amoníaco es un compuesto tóxico y corrosivo, por lo que se deben tomar medidas de seguridad adecuadas en su manejo y almacenamiento (Diez Lorenzo, 2022).

CAPÍTULO 3 – HERRAMIENTAS

Contenido

3.1. Instalación experimental.

3.2. Modelo 1D del motor.

3.1. Instalación experimental

Primeramente, en la Tabla 3.1 se muestran las características del motor usado en este Trabajo Fin de Grado. Por otro lado, en la Figura 3.1 se presenta un esquema general de la instalación experimental y del motor diésel utilizado. En esta figura, cada círculo y cuadrado representa un sensor de presión y temperatura que hay en la instalación. Además, se utilizarán los esquemas unifilares presentados en las Figuras 3.2 y 3.4 para describir algunas partes de la instalación con mayor detalle.

ATRIBUTO	DESCRIPCIÓN
Tecnología del motor base	Euro 6 HDi
Cilindrada	1997 cc
Relación de compresión	16.7:1
Número de cilindros	4 en línea
Diámetro / Carrera	85 / 88 mm
Válvulas por cilindro (admisión / escape)	2 / 2
Tipo de inyección	Inyección directa de alta presión
Tecnología del turbocompresor	Turbina de geometría variable

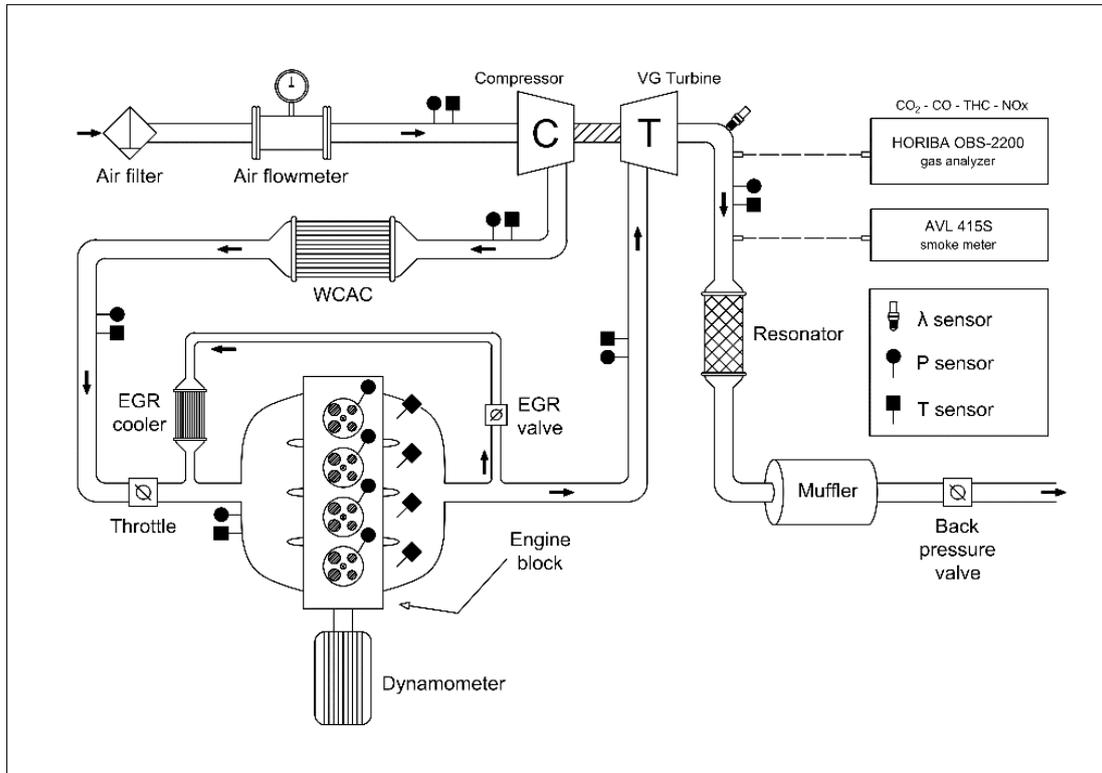
1. Tabla 3.1: Características del motor base.

El aire atmosférico pasa por un filtro que es el responsable de limpiar el aire antes de que ingrese al motor, evitando que partículas y contaminantes dañinos lleguen a los cilindros. Después pasa por un caudalímetro, que es un componente utilizado en los sistemas de admisión de aire, éste proporciona información precisa sobre el gasto másico de aire.

A continuación, se dirige al compresor donde aumenta su presión y su temperatura. El principal objetivo del compresor es comprimir el aire para aumentar el gasto de aire trasegado por el motor. A la salida del compresor se encuentra un intercambiador de calor que tiene como función reducir la temperatura del aire ya comprimido, lo que aumenta su densidad.

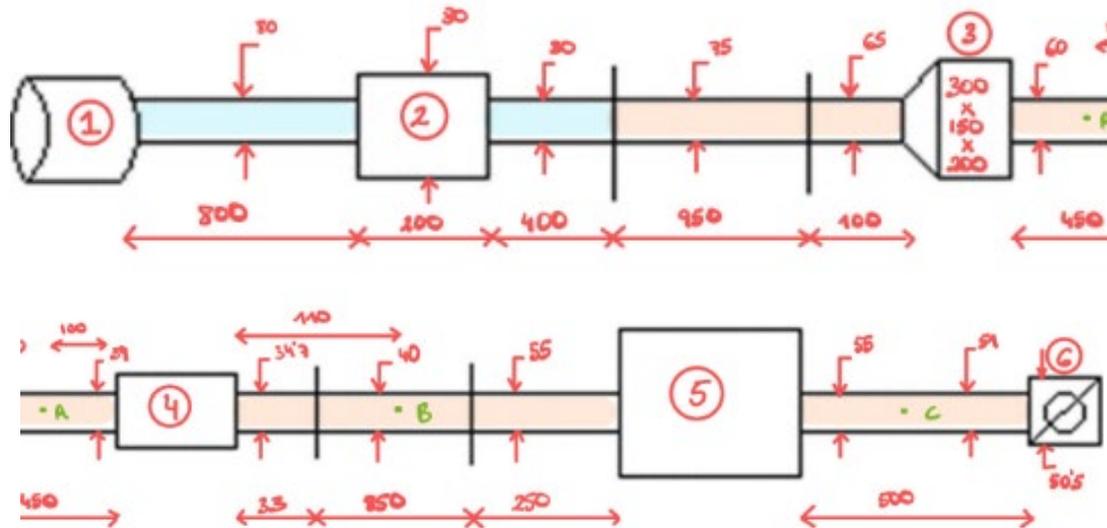
Después de este componente, se encuentra la válvula mariposa, usada en este caso para incrementar la tasa de EGR. En cuanto a la línea EGR (Recirculación de Gases de Escape), esta tiene la función de recircular parte de los gases de escape nuevamente hacia

la cámara de combustión, lo que hace que disminuya la temperatura local de combustión y a su vez reduzca la formación de NOx que son gases contaminantes.



5. Figura 3.1: Esquema general de la instalación experimental

Por su parte, el bloque motor consta de cuatro cilindros. Cada cilindro tiene un pistón que se mueve de forma alternativa dentro del mismo. Cuando el combustible se inyecta y se produce la combustión, la energía generada produce un aumento de presión que empuja el pistón, y este movimiento lineal del pistón se transmite a través de una biela a un cigüeñal. A la salida de los cilindros se encuentra la turbina, donde los gases de escape entran a altas temperaturas. Allí, la energía térmica y cinética de los gases se convierte en energía mecánica. Por último, se instala una válvula en la línea de escape, denominada “válvula de contrapresión”, para simular la pérdida de carga de los sistemas de postratamiento (los cuales no han sido instalados).



- | | |
|----------------------------------|---|
| 1 Filtro de aire | A Sensor temperatura y presión entrada compresor |
| 2 Caudalímetro | B Sensor temperatura y presión salida compresor |
| 3 Filtro de aire del motor | C Sensor temperatura y presión salida intercambiador de calor |
| 4 Compresor | |
| 5 WCAC (intercambiador de calor) | |
| 6 Throttle (válvula mariposa) | |

6. Figura 3.2: Esquema unifilar del sistema de admisión con medidas (en mm). Los conductos que están pintados de azul son de aluminio y los que están pintados de naranja son de plástico.

El sistema de admisión de un motor diésel es el responsable de suministrar aire limpio al motor para la combustión. El sistema de admisión del motor usado se divide en varias partes. A continuación, se describen de forma detallada las principales partes de dicho sistema de admisión:

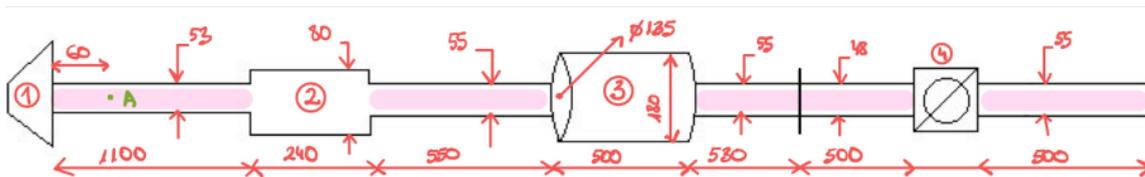
- Filtro de aire. La función de este componente es eliminar los contaminantes y partículas del aire que entran al motor. Es importante que entre aire limpio para evitar el desgaste temprano del motor y así que haya un buen rendimiento.
- Caudalímetro, este componente tiene como función principal medir el gasto de aire que trasiega el motor. En este caso, se trata de un sensor de hilo caliente, en el que un alambre delgado se coloca en el flujo de aire. Cuando el aire pasa por ese alambre, se produce un enfriamiento menor o mayor dependiendo del gasto de aire. Éste se mide a partir de la cantidad de corriente eléctrica necesaria para que el alambre se mantenga a una temperatura constante (Traslaviña y otros, 1982).
- Compresor centrífugo radial.

- Intercambiador de calor o intercooler, cuya función es enfriar el aire comprimido antes de que ingrese a los cilindros.
- Válvula de mariposa de 50.5 mm de diámetro, se encuentra ubicada justo antes de la unión de EGR.



7. Figura 3.3: Válvula mariposa del motor diésel.

- Sensores de temperatura y presión. En este caso, se han utilizado termopares de tipo K y transmisores de presión piezorresistivos, los cuales están situados a la entrada y salida del compresor, a la salida del intercambiador de calor o *intercooler* y en el colector de admisión.



- A: Sensor presión y temperatura salida turbina
 1: Turbina
 2: Conducto flexible
 3: Silenciador
 4: Válvula de compresión

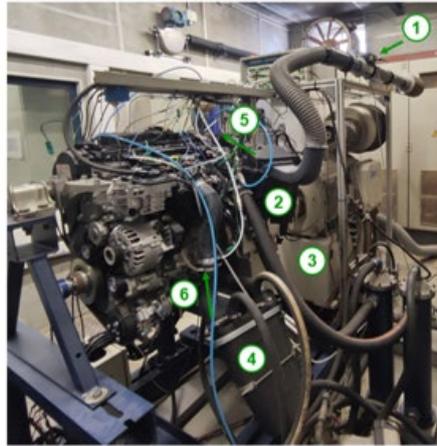
8. Figura 3.4: Esquema unifilar del sistema de escape con medidas (en mm). Los conductos que están pintados en rosa son de hierro fundido.

En cuanto al sistema de escape del motor, sus componentes se muestran en el esquema de la Figura 3.4:

- Turbina de geometría variable, donde se aprovecha la energía de los gases de escape que se liberan durante la combustión.
- Silenciador, también llamado silenciador de escape o silenciador final. Utiliza cámaras de expansión, materiales absorbentes y deflectores que reducen el ruido generado por el motor (Acosta y Torrado, 1990).

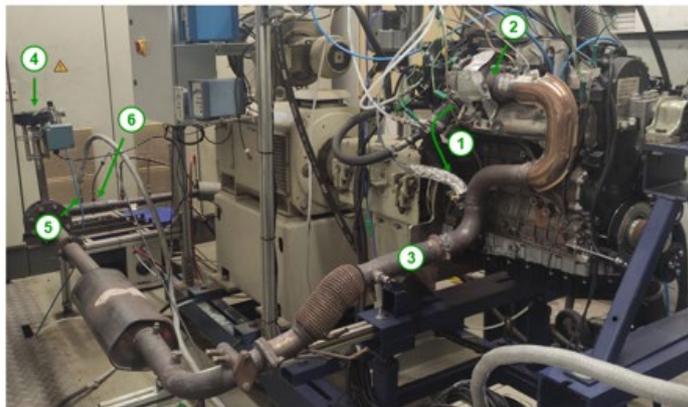
- Válvula de contrapresión, se usa para reproducir la pérdida de carga que generarían los sistemas de postratamiento (los cuales no han sido instalados) (Acosta y Torrado, 1990).
- Sensores de temperatura y presión del mismo tipo que en la admisión, instalados a la entrada y a la salida de la turbina.

Finalmente se muestra una foto del motor que hay en la sala de ensayos y se nombran algunas de las partes que se pueden apreciar en esa imagen.



1. Caudalímetro
2. Filtro de aire
3. DYNAS3 dinamómetro
4. WCAC (intercooler)
5. Entrada compresor
6. Colector de admisión

9. Figura 3.5: Imagen del sistema de admisión del motor de encendido por compresión instalado en el banco de ensayos.



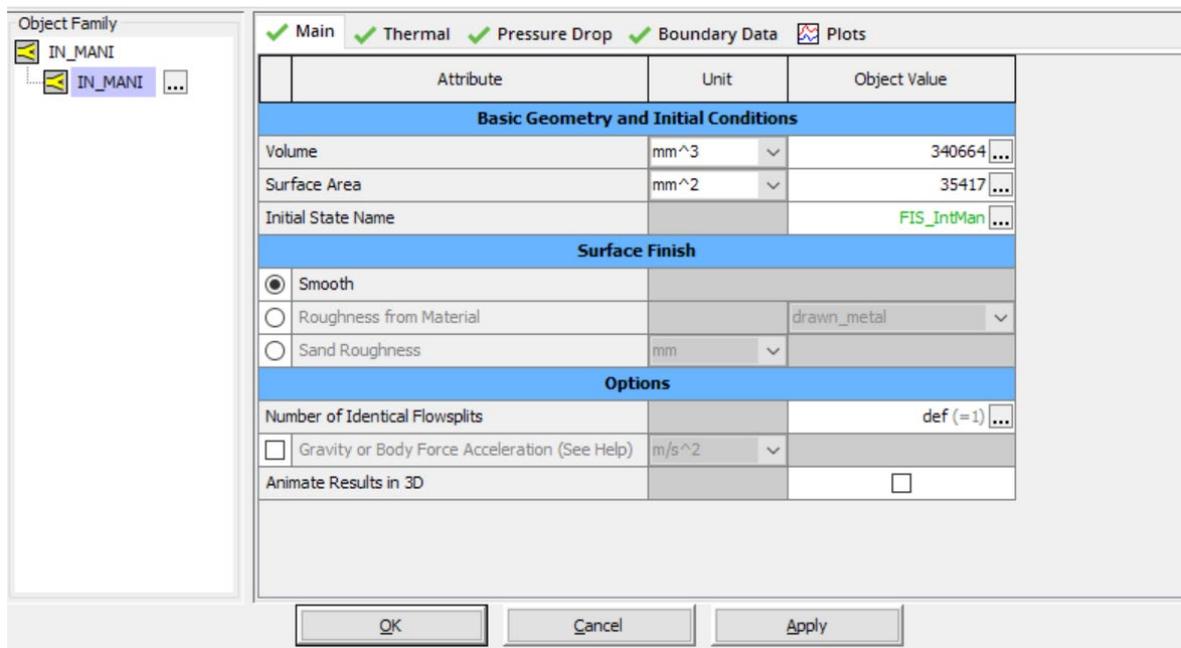
1. Salida del compresor
2. Turbina
3. Tubo de escape
4. Válvula de contrapresión
5. Muestreo de gas para OBS
6. Muestreo de gas para opacímetro

10. Figura 3.6: Imagen del sistema de escape del motor de encendido por compresión instalado en el banco de ensayos.

3.2. Modelo 1D del motor

Para el modelado 1D del motor se ha usado el software comercial GT-Power, desarrollado por la compañía Gamma Technologies. En este programa se pueden simular cualquier tipo de motor, ya sea de automoción, trenes o generadores de energía. GT-Power permite realizar un análisis completo del funcionamiento del motor.

En el modelo del motor, se ha reproducido la instalación experimental explicada en la Figura 3.1, utilizando algunos de los siguientes elementos: conductos, volúmenes, uniones en T, orificios, válvulas, cilindros y un turbocompresor. En la Figura 3.7, se muestra un ejemplo de las características geométricas que hay que introducir en el programa para definir un elemento 0D que, en este caso, conforma el colector de admisión. En la Figura 3.8, se muestra otro ejemplo en el que se detallan las características geométricas que hay que introducir en el programa para definir un elemento 1D.



11. Figura 3.7: Ejemplo de configuración de un objeto (colector de admisión)

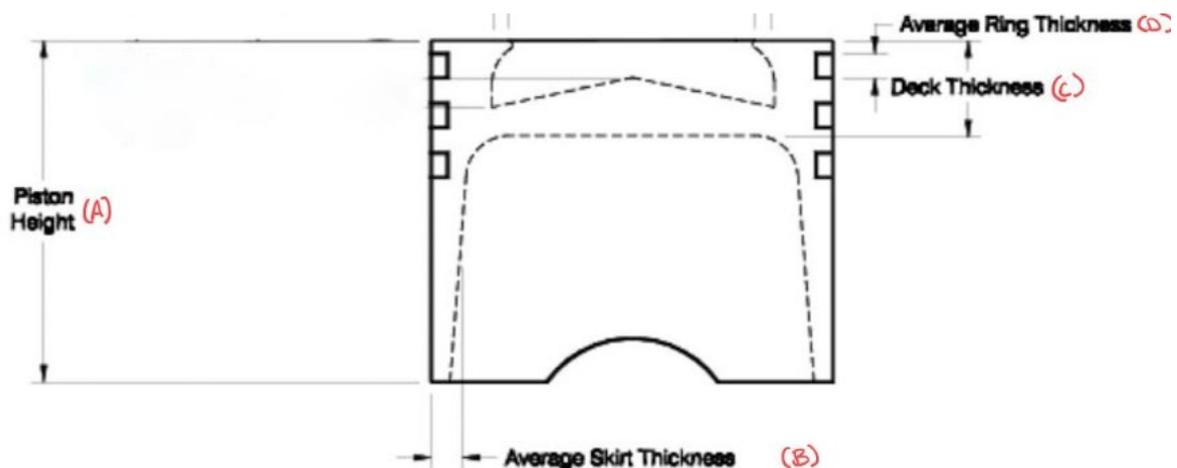
A continuación, también se explica cómo se modelan algunos de los componentes más relevantes del motor: pistones, cilindros, válvulas o el turbocompresor.

Object Family		
Air_filter_line_1		
Air_filter_line_1		
Attribute	Unit	Object Value
Basic Geometry and Initial Conditions		
Diameter at Inlet End	mm	75 ...
Diameter at Outlet End	mm	75 ...
Length	mm	950 ...
Discretization Length	mm	20 ...
Initial State Name		RS_VolEff ...
Surface Finish		
<input checked="" type="radio"/> Smooth		
<input type="radio"/> Roughness from Material		drawn_metal ...
<input type="radio"/> Sand Roughness	mm	
Options		
Radius of Bend	mm	ign ...
Angle of Bend	deg	ign ...
Number of Identical Pipes		def (=1) ...
Model Gravity or Pipe Motion		<input type="checkbox"/>
Animate Results and Reaction Forces in 3D		<input type="checkbox"/>

12. Figura 3.8: Medidas filtro de aire en GT-Power

PISTÓN

El pistón generalmente es una pieza cilíndrica hecha de aleaciones de aluminio o de hierro fundido y se mueve dentro de un cilindro, tiene como función convertir la energía generada por la combustión en fuerza mecánica para así impulsar el cigüeñal. Por último, cabe destacar que el pistón tiene anillos de sellado, éstos se ajustan a las paredes del cilindro y ayudan a sellar el espacio de combustión del cilindro durante el proceso de combustión y así poder evitar fugas de gases y optimizar la eficiencia del motor (Soriano y Antonio, 2016). La Figura 3.9 muestra las principales características geométricas del pistón introducidas en el modelo.



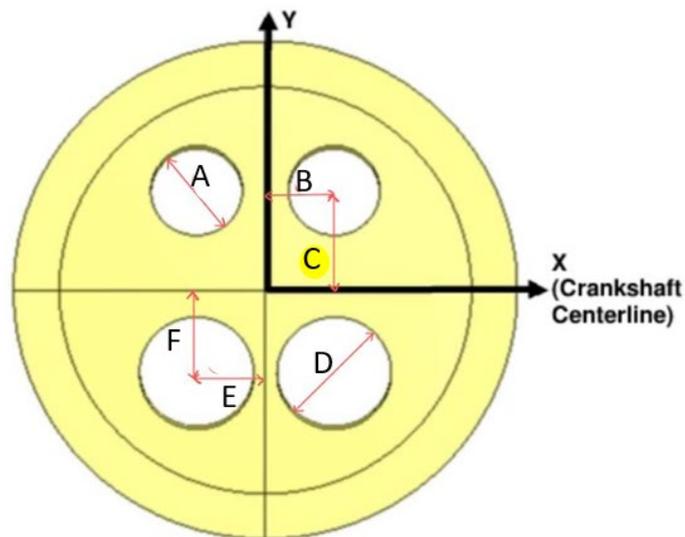
- A- altura del pistón: 72.7 mm
- B- grosor medio del faldón: 4.7 mm
- C- Deck thickness: 15 mm
- D- grosor medio del anillo: 2 mm

13. Figura 3.9: Esquema de las medidas del pistón

VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE

Las válvulas de admisión y escape son componentes esenciales en un motor diésel y están ubicadas en la culata del cilindro (Diesel and Gas Turbine Worldwide Catalog, 1969-2009). Cada cilindro del motor tiene tanto dos válvulas de admisión y dos válvulas de escape, éstas trabajan en conjunto para así permitir la entrada y la salida de gases en el cilindro durante el ciclo de trabajo.

En la Figura 3.10, se muestran los diámetros de cada válvula y la posición relativa de dichas válvulas con respecto al centro de la de cara superior.



A- Diámetro de la válvula de escape: 24.3 mm

B- Coordenada x del centro de la válvula de escape: 19 mm

C- Coordenada y del centro de la válvula de escape: 18.5 mm

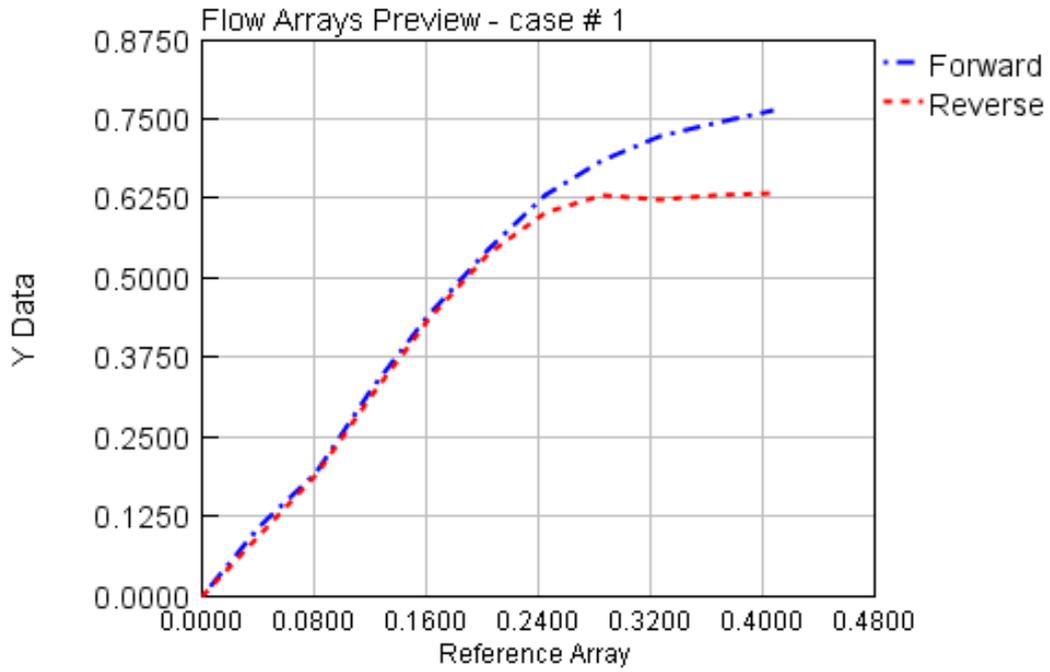
D- Diámetro de la válvula de admisión: 26.7 mm

E- Coordenada x del centro de la válvula de admisión: 20 mm

F- Coordenada y del centro de la válvula de admisión: 16.5 mm

14. Figura 3.10: Esquema de las válvulas de admisión y escape

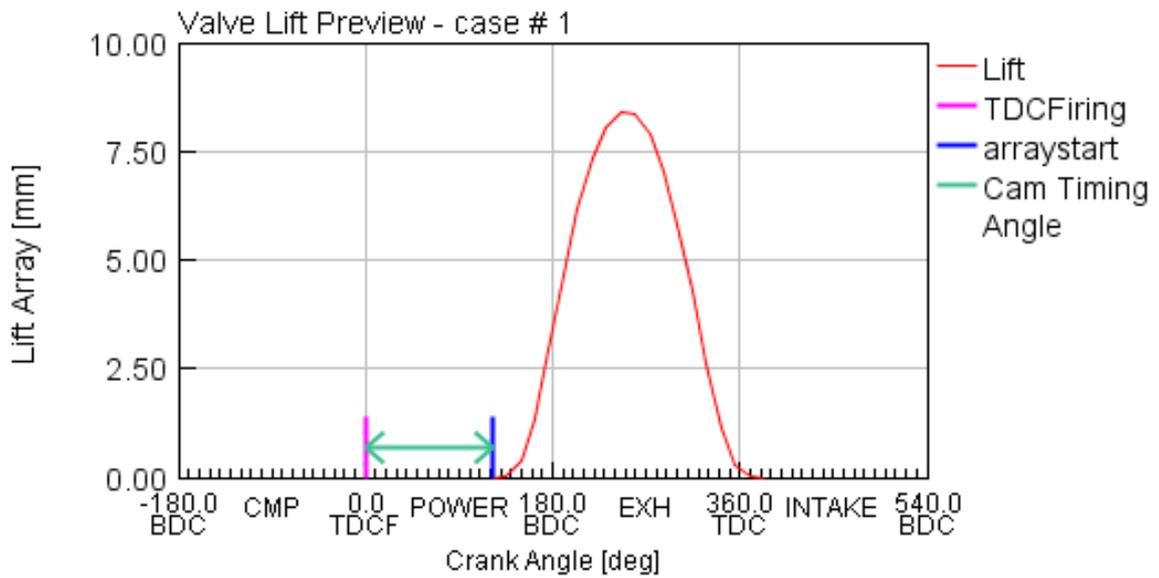
Los perfiles de levantamiento de las válvulas de admisión y escape y las curvas características de estas válvulas han sido directamente proporcionados por el fabricante del motor, y se muestran en las Figuras 3.11 y 3.12.



Eje y (coeficiente de descarga)

Eje x (levantamiento entre diámetro)

15. Figura 3.11: Curva característica de las válvulas de admisión



Eje y (levantamiento de la válvula en mm)

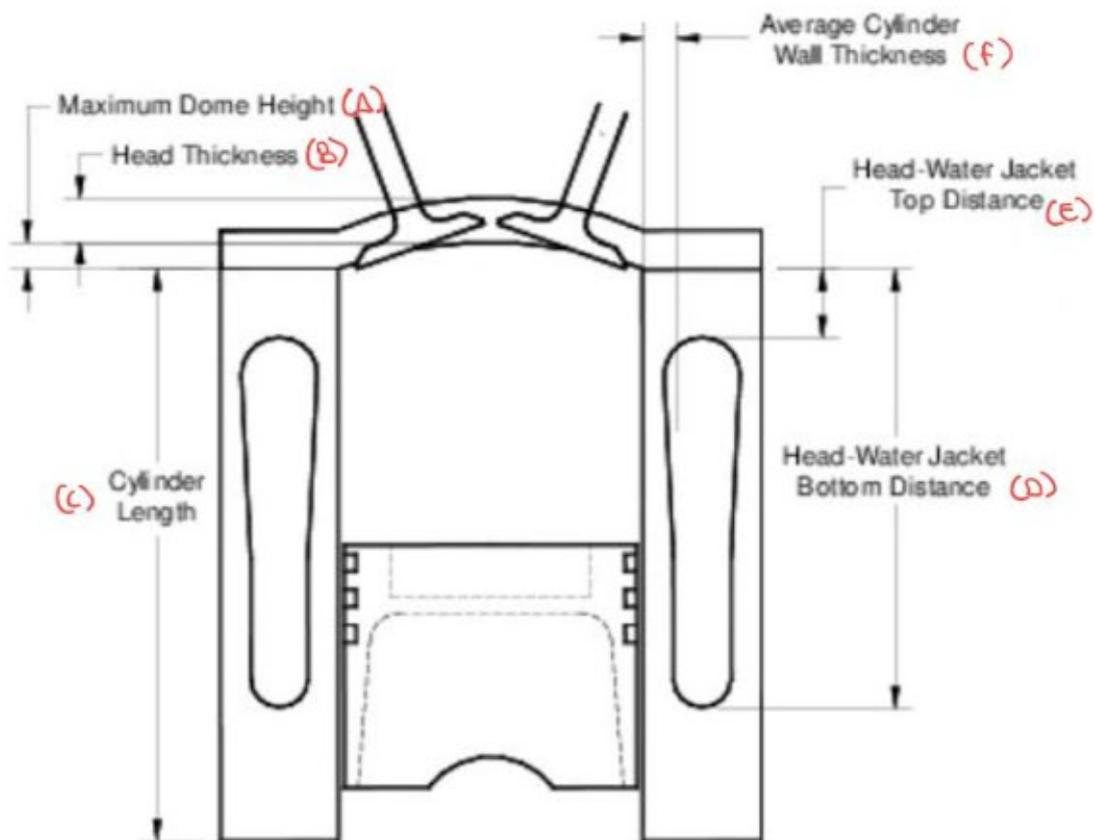
Eje x (ángulo del cigüeñal en grados)

16. Figura 3.12: Perfil de levantamiento de las válvulas de escape

CILINDRO:

El cilindro es el componente donde se lleva a cabo el proceso de combustión interna. Tiene una estructura tubular hecha de hierro fundido o aleaciones de aluminio que aloja al pistón y otras partes importantes del motor. Durante el proceso de combustión, el cilindro está expuesto a altas temperaturas y presiones, por lo que es muy importante que sea resistente para garantizar una buena durabilidad y confiabilidad en el motor.

En la Figura 3.13, se muestra la sección longitudinal del cilindro junto con algunas de sus principales características geométricas, todas ellas introducidas en el modelo.



A- Altura máxima de la cúpula: 0 mm

B- Espesor de la culata: 5 mm

C- Altura del cilindro: 157 mm

D- Distancia entre la culata y la parte inferior de la camisa de agua: 87 mm

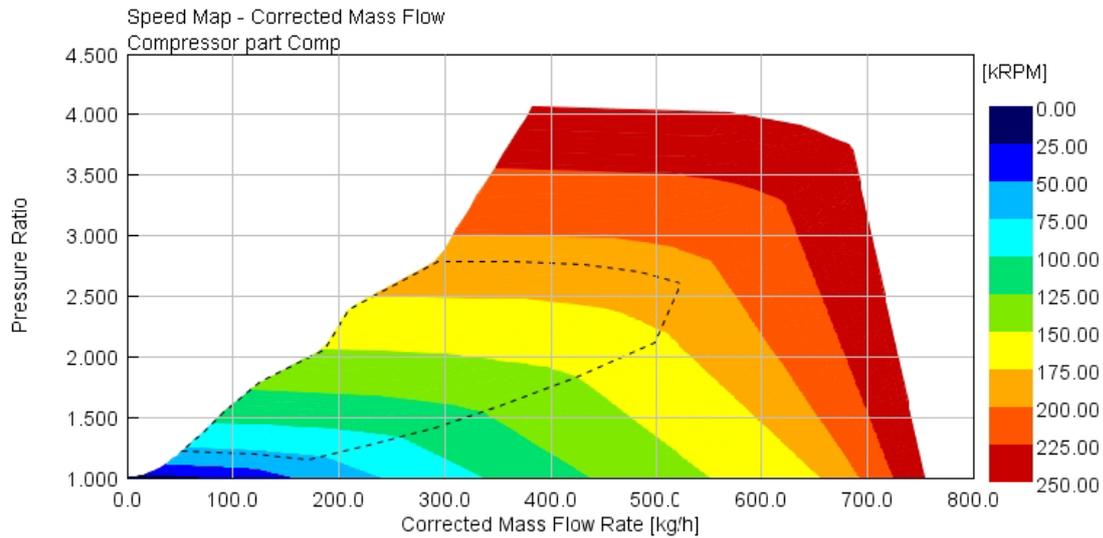
E- Distancia entre la culata y la parte superior de la camisa de agua: 0 mm

F- Espesor medio de la pared del cilindro: 10 mm

17. Figura 3.13: Esquema del cilindro

TURBOCOMPRESOR

Los mapas de la turbina y el compresor han sido proporcionados por el fabricante del motor. En la siguiente imagen, se puede ver el mapa del compresor con los datos de gasto másico corregido, relación de compresión y régimen de giro.



Eje y (relación de compresión)

Eje x (gasto corregido en kg/h)

Las curvas de color son el régimen de giro de motor.

18. Figura 3.14: Mapa del compresor

CAPÍTULO 4 – METODOLOGÍA

En este apartado se explicará cómo se han usado las herramientas que anteriormente se han descrito (instalación experimental y modelo 1D del motor). En primer lugar, a través de la instalación experimental, se han llevado a cabo una serie de ensayos en los que el motor fue alimentado con diésel. Posteriormente, estos ensayos se han simulado para ajustar el modelo 1D del motor. Una vez calibrado, se ha utilizado el modelo para simular el comportamiento del motor con amoniaco.

En la Tabla 4.1, se muestran los datos más relevantes de los ensayos experimentales de plena carga utilizados para la calibración del modelo.

Régimen del motor	rev/min	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000
Temperatura en el colector de admisión	°C	49.79	57.83	57.21	59.22	57.93	58.73	58.96
Temperatura en el colector de escape	°C	654.75	806.36	835.64	814.63	812.83	815.23	816.82
Presión en el colector de admisión	Bar	2.07	2.61	2.60	2.66	2.68	2.71	2.71
Presión en el colector de escape	Bar	2.18	2.39	2.40	2.65	2.75	2.95	3.14
Consumo de Combustible	kg/h	9.50	16.26	18.80	20.71	22.78	24.02	25.48
Par	Nm	280.29	389.26	391.77	393.93	385.21	375.17	363.23
Gasto de aire	kg/h	172.25	243.07	283.94	336.41	375.15	409.87	440.54

2. Tabla 4.1: Tabla de datos experimentales con diésel

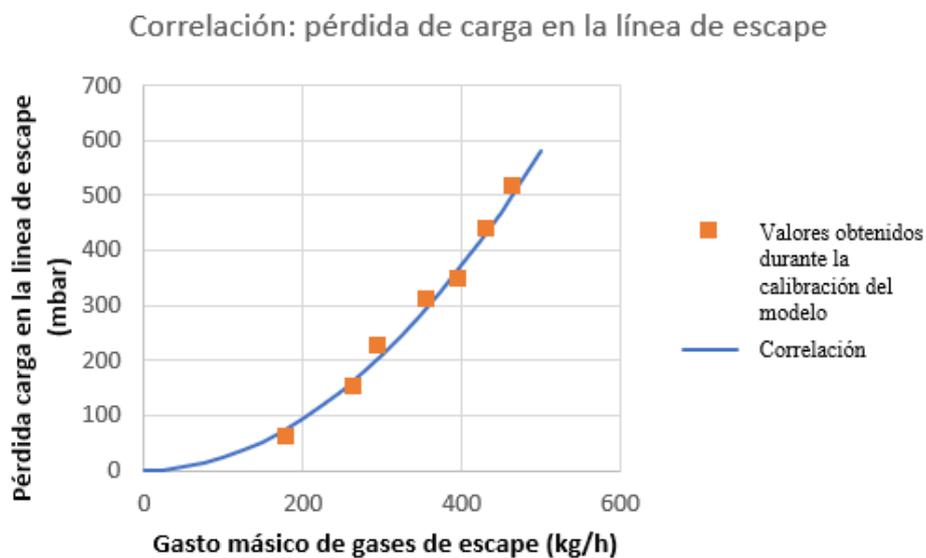
Estos ensayos se han simulado para calibrar el modelo en ese rango de operación. Para ello, se han configurado unos controladores de tipo PI y se ha desacoplado el turbocompresor para así poder controlar de forma simultánea las condiciones de presión y temperatura en los colectores de admisión y escape. Los controladores PI son un tipo de controlador utilizado en sistemas de control automático para ajustar y mantener una variable de proceso como la temperatura, la velocidad o la presión en un valor deseado.

Como consecuencia del proceso de calibración del modelo, se obtienen unas correlaciones para ajustar los fenómenos de transmisión de calor y pérdida de carga en diferentes partes del motor (conductos, colectores, orificios, etc.). En concreto, se han implementado cuatro correlaciones en el modelo 1D, a fin de corregir las pérdidas de carga en el filtro; las pérdidas de carga en el intercambiador de calor; la transmisión de calor en el colector de escape, para que la temperatura a la entrada de la turbina sea la

adecuada; y también se regula la contrapresión, es decir, la pérdida de carga en la línea de escape.

A continuación, se describen las correlaciones introducidas en el modelo con mayor detalle:

- Filtro de aire: se utiliza un polinomio de segundo grado para ajustar la pérdida de carga en el filtro de aire, donde la variable dependiente (y) es el multiplicador de fricción y la variable independiente (x) es el gasto de aire.
- Intercambiador de calor (WCAC): se usa un polinomio de segundo grado para ajustar la pérdida de carga en el WCAC, la variable “y” es el multiplicador de fricción y la variable “x” es el gasto de aire que pasa por éste.
- Colector de escape: las variables independientes son el gasto de gases de escape y la temperatura a la que salen los gases de la cámara de combustión en Kelvin. En este caso, la variable dependiente es el multiplicador de la transmisión de calor, el cual está correlacionado con las otras dos mediante un polinomio de primer grado.
- Línea de escape: la variable independiente es el gasto de gases de escape, mientras que la variable dependiente es la pérdida de carga de la línea. La pérdida de presión en la línea de escape es proporcional al cuadrado del gasto. La Figura 4.1 muestra la regresión cuadrática de la pérdida de carga en la línea de escape.



19. Figura 4.1: Correlación pérdida de carga en la línea de escape

Para simular el proceso de combustión en los siete casos presentados en la Tabla 4.1, se han utilizado los datos de presión en el cilindro. A partir de estos datos, el modelo es capaz de calcular la tasa de liberación de calor. La tasa de liberación de calor es la velocidad a la que se quema el combustible.

Una vez implementadas las correlaciones mencionadas y tras eliminar los controladores PI, el modelo queda listo para llevar a cabo simulaciones predictivas. Así pues, se simularon de nuevo los mismos siete casos con diésel y con amoníaco. Para hacer las simulaciones con amoníaco hay que hacer una serie de cambios respecto al modelo 1D del motor diésel. En primer lugar, se cambia la relación de compresión de 16,7 a 18, ya que los pistones son diferentes para facilitar la combustión del amoníaco. También se han cambiado los inyectores, ya que en el motor diésel hay inyección directa, y en el caso del amoníaco hay un inyector en cada pipa o puerto de admisión (inyección indirecta). El amoníaco se inyecta en fase gas a 30 °C. En estos inyectores se especifica la velocidad a la que sale el amoníaco y que cantidad de aire está entrando en el motor. Por otro lado, hay que tener en cuenta que la relación estequiométrica aire-combustible del amoníaco es inferior (6.05) a la del diésel (14.5) (Núñez, 2007). Además, el amoníaco tiene un poder calorífico de 18.59 MJ/kg que es bastante inferior al poder calorífico del diésel (42.1 MJ/kg).

En cuanto al proceso de combustión con amoníaco, se simula mediante la función de Wiebe, la cual se utiliza para modelar la forma en la que la energía se libera durante la combustión en motores de combustión interna. Para usar la función de Wiebe, es necesario definir los valores de CA50 y CA1090. El CA50 es el ángulo de cigüeñal en el que se ha quemado la mitad del combustible, mientras que el CA1090 es la duración de la combustión. En concreto, se ha usado un valor de CA50 de 7.50, ya que el valor óptimo está entre 5 y 10 (Lavoie y otros, 2013). Según la referencia (Lhuillier y otros, 2020), el valor CA1090 para una combustión con amoníaco es de al menos 35 grados de cigüeñal. Por último, se controla la posición de la TGV para conseguir con amoníaco el mismo par que con diésel.

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS

Contenido

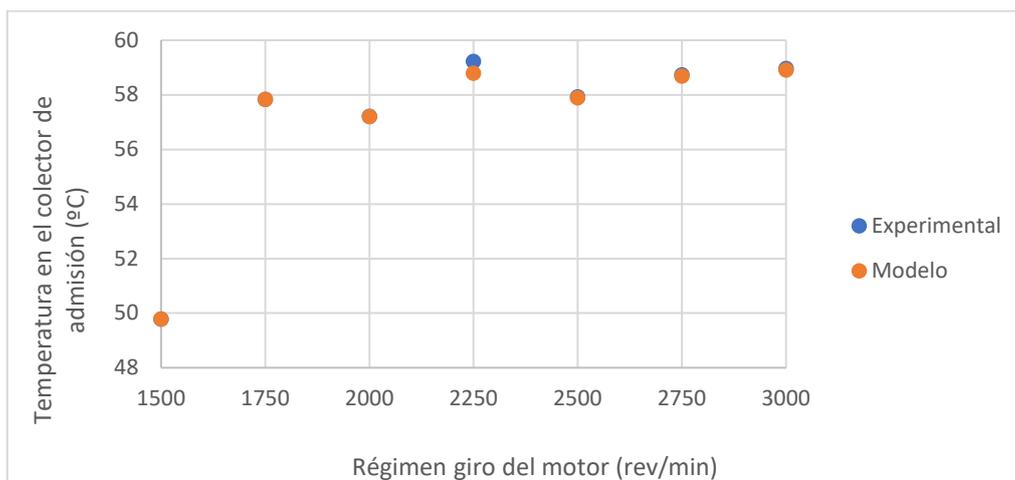
5.1 Validación del modelo

5.2 Comparativa diésel vs amoníaco

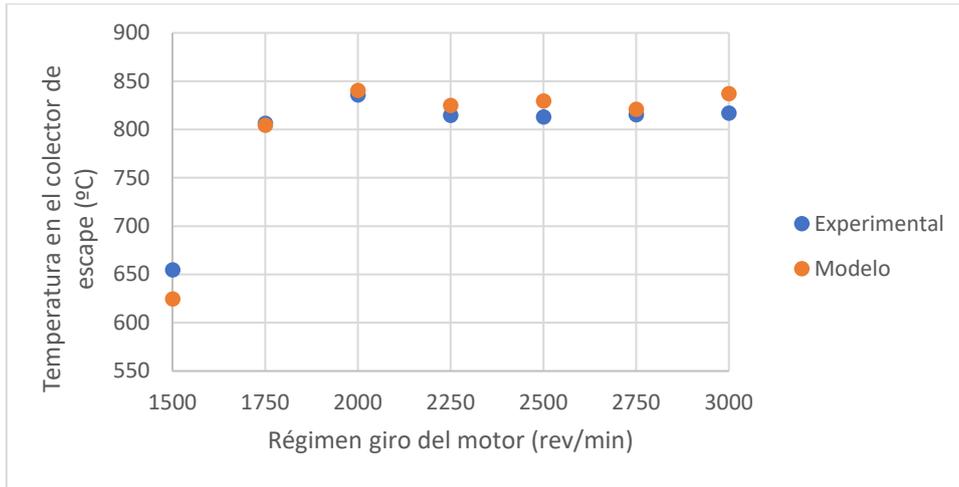
5.1 VALIDACIÓN DEL MODELO

En este apartado se van a comparar los resultados experimentales presentados en la tabla 4.1 (usando diésel como combustible) y los obtenidos con el modelo 1D con los controladores PI activados y el turbocompresor desacoplado. En las gráficas que se muestran a continuación se comparan los valores experimentales y de modelado de las variables de temperatura y presión en los colectores de admisión y escape, combustible, par y el gasto de aire.

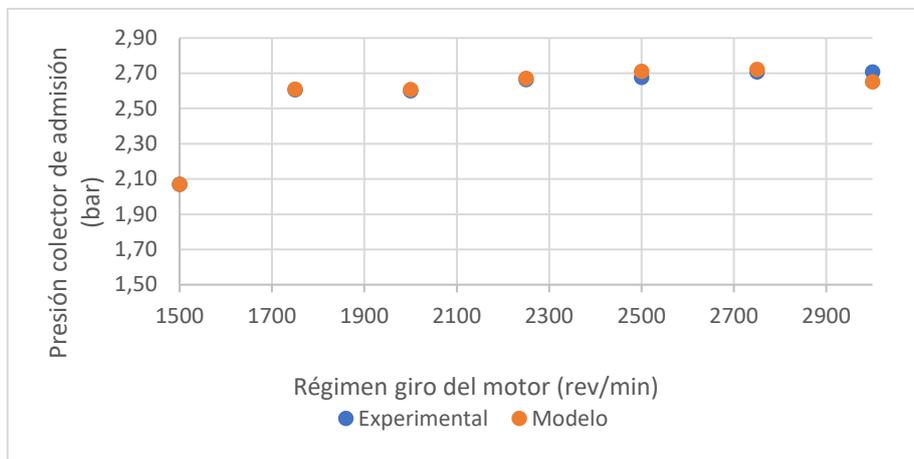
En algunos de estos gráficos, no hay errores o hay errores muy pequeños porque la variable está siendo controlada directamente por un PI, como son la presión y la temperatura en los colectores de admisión y de escape y el combustible. La presión en el colector de admisión se controla modificando el régimen de giro del compresor, mientras que la presión en el colector de escape se ajusta mediante la posición de la TGV. En cuanto a las temperaturas, se ajusta la transmisión de calor en el WCAC y en el colector de escape para conseguir los valores de temperatura experimentales. La cantidad de combustible se impone directamente en el modelo. Los valores experimentales y de modelado de estas cinco variables se muestran en las Figuras 5.1, 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5.



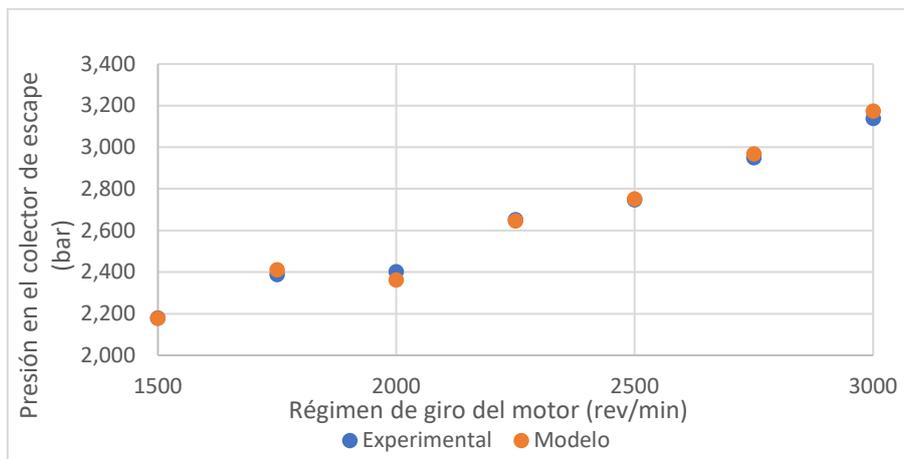
20. Figura 5.1. Modelo vs experimental: temperatura en el colector de admisión



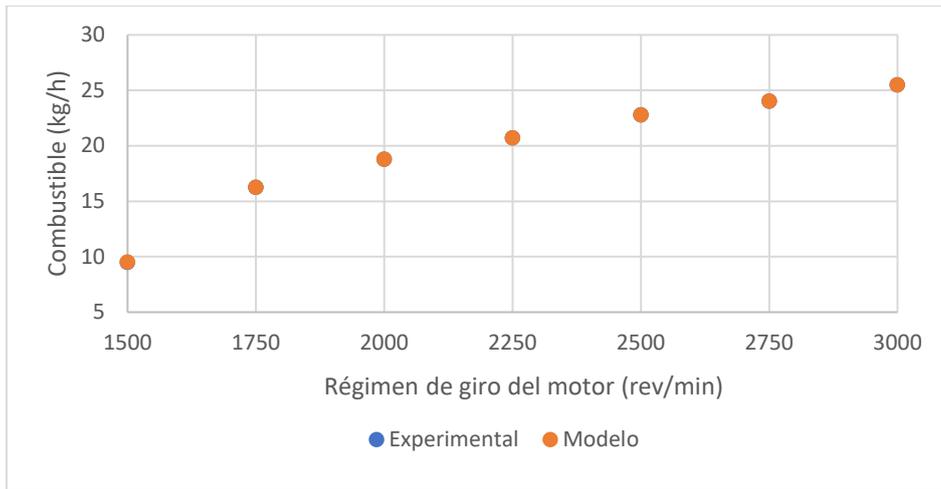
21. Figura 5.2. Modelo vs experimental: temperatura en el colector de escape.



22. Figura 5.3. Modelo vs experimental: presión en el colector de admisión

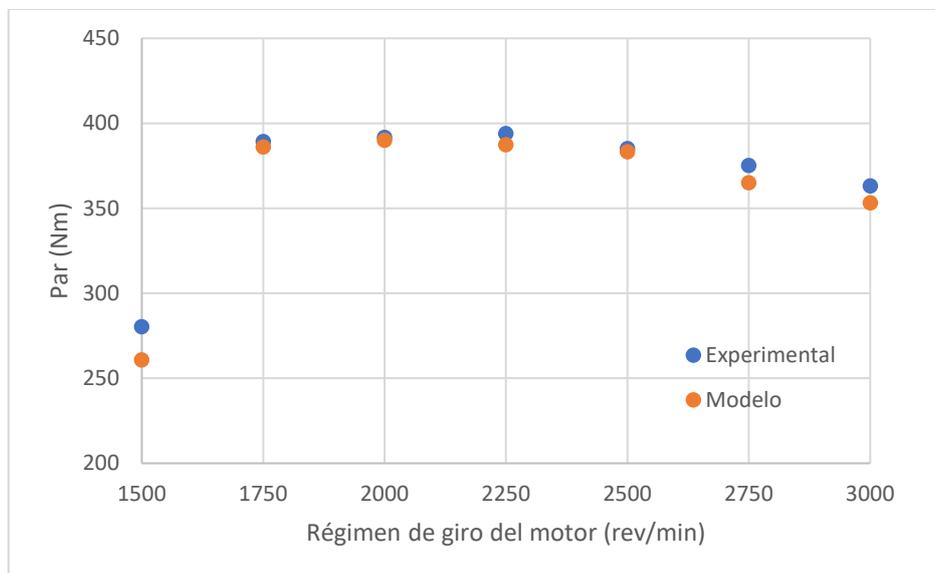


23. Figura 5.4. Modelo vs experimental: presión en el colector de escape



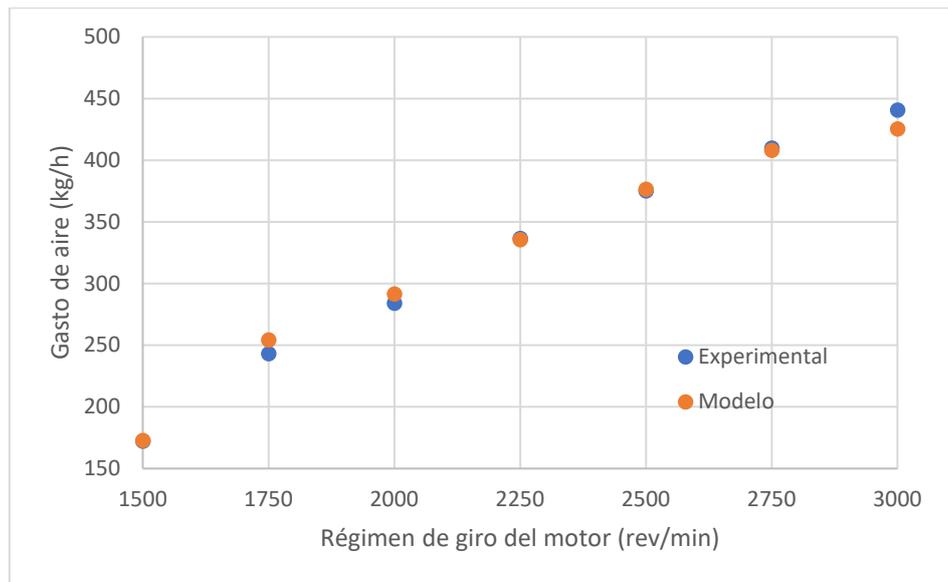
24. Figura 5.5. Modelo vs experimental: combustible

Una vez comprobado que los valores experimentales de presión y temperatura en los colectores de admisión y escape se han reproducido con precisión con el modelo, se analizan los errores en par y gasto de aire. En la Figura 5.6, se puede apreciar que los errores en par son generalmente pequeños, por debajo del 3% en todos los puntos excepto a 1500 rev/min; donde el error es de casi el 7%.



25. Figura 5.6. Modelo vs experimental: par del motor

En la Figura 5.7, se muestran los valores experimentales y de modelado del gasto de aire para los siete puntos de operación simulados. Tal y como se aprecia en esta figura, los errores en gasto de aire son pequeños, generalmente por debajo del 3%. El error máximo se observa a 1750 rev/min y es igual a 4.6%.



26. Figura 5.7. Modelo vs experimental: gasto de aire del motor

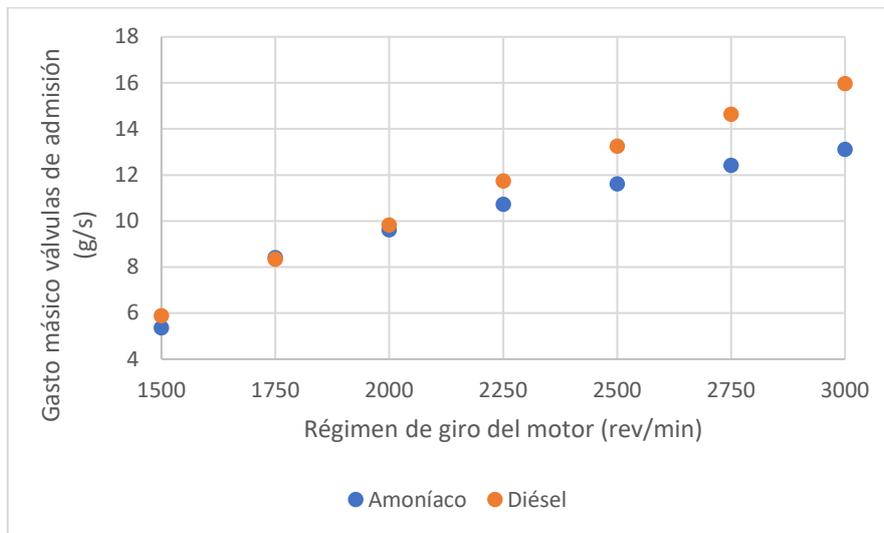
Los errores de modelado de las variables mencionadas respecto a los datos experimentales se muestran en la Tabla 5.1. Como se puede ver en la tabla y como ya se ha comentado, los errores en gasto de aire y en par son inferiores al 3% en la mayor parte de los casos; por lo que es posible afirmar que el modelo reproduce bien los procesos de renovación de la carga y combustión, y replica bien las pérdidas de calor en los cilindros y las pérdidas por fricción. En definitiva, en base a los errores mostrados en la Tabla 5.1, se puede concluir que el modelo reproduce bien el comportamiento real del motor a plena carga.

ERROR ABSOLUTO	°C	0.00	-0.01	-0.01	-0.43	-0.04	-0.04	-0.06	Temperatura colector admisión
ERROR ABSOLUTO	°C	-30.07	-1.98	4.58	10.03	16.58	5.78	20.25	Temperatura colector escape
ERROR RELATIVO	%	-0.04	0.17	0.26	0.32	1.27	0.55	-2.08	Presión colector admisión
ERROR RELATIVO	%	-0.08	0.95	-1.68	-0.26	0.17	0.65	1.14	Presión colector escape
ERROR RELATIVO	%	0.03	-0.01	0.00	-0.02	0.01	0.00	0.01	Combustible
ERROR RELATIVO	%	-6.96	-0.83	-0.44	-1.65	-0.52	-2.70	-2.75	Par
ERROR RELATIVO	%	0.30	4.60	2.68	-0.31	0.32	-0.49	-3.43	Gasto de aire

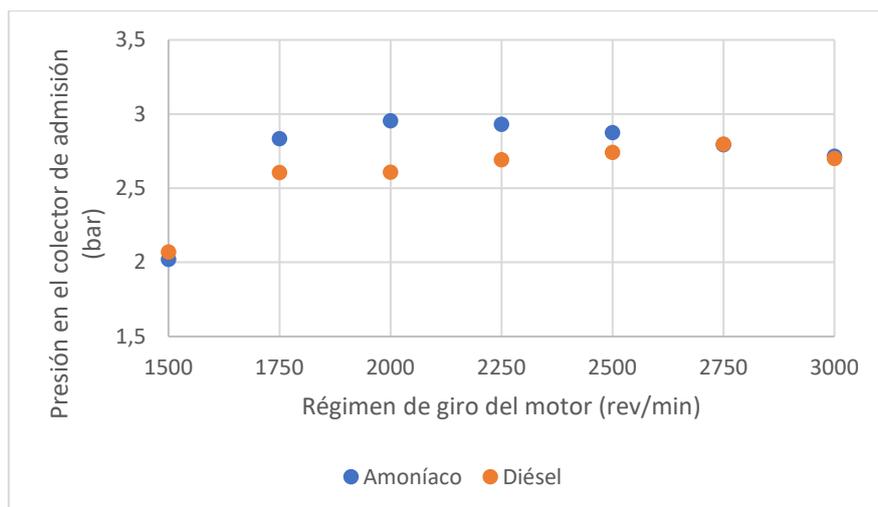
3. Tabla 5.1: Errores de modelado

5.2 COMPARATIVA DIÉSEL VS AMONIACO

En este apartado, solo se incluirán los resultados del modelado tanto con diésel como con amoniaco, una vez validado el modelo 1D del motor. Como se ha comentado antes, se han simulado los mismos siete puntos de operación (plena carga) con diésel y con amoniaco, una vez introducidas las correlaciones en el modelo y eliminados los controladores PI. En la Figura 5.8 y 5.9, se muestran las siguientes variables para los siete puntos de operación: el gasto másico a través de las válvulas de admisión y la presión en el colector de admisión.



27. Figura 5.8. Amoniaco vs diésel: gasto másico a través de las válvulas de admisión



28. Figura 5.9. Amoniaco vs diésel: presión en el colector de admisión

Tal y como se aprecia en estas figuras, el gasto másico a través de las válvulas de admisión es menor con amoniaco a pesar de que la presión en el colector es incluso mayor en

algunos puntos. En el caso con diésel, únicamente se introduce aire a través de las válvulas, ya que el diésel se inyecta directamente en ella. Mientras que, en los casos con amoníaco, éste se inyecta en las pipas de admisión, por lo que se introduce tanto aire como amoníaco por las válvulas de admisión.

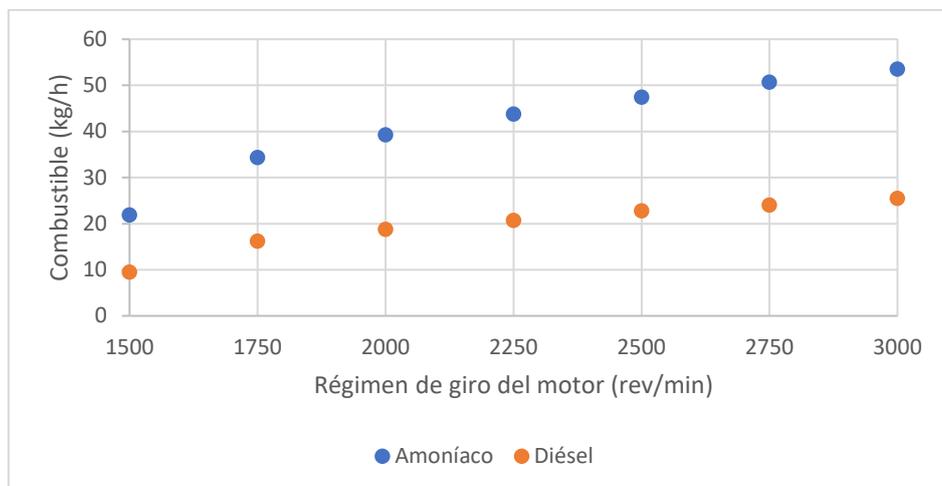
En un motor de combustión interna alternativo, la cantidad de gases que trasiega el motor está directamente relacionada con la densidad de los gases en el colector de entrada. Cuando la densidad es mayor, una mayor cantidad de gases entra en el cilindro, lo que significa que más aire o gases ingresan a través de las válvulas. Dicha densidad depende de la presión, la temperatura, y la composición de los gases de entrada (a través de la constante “Rg” de los gases), tal y como se puede observar en la ecuación de la Figura 5.10:

$$\rho = \frac{P_{int}}{R_g T_{int}}$$

29. Figura 5.10: Ecuación densidad

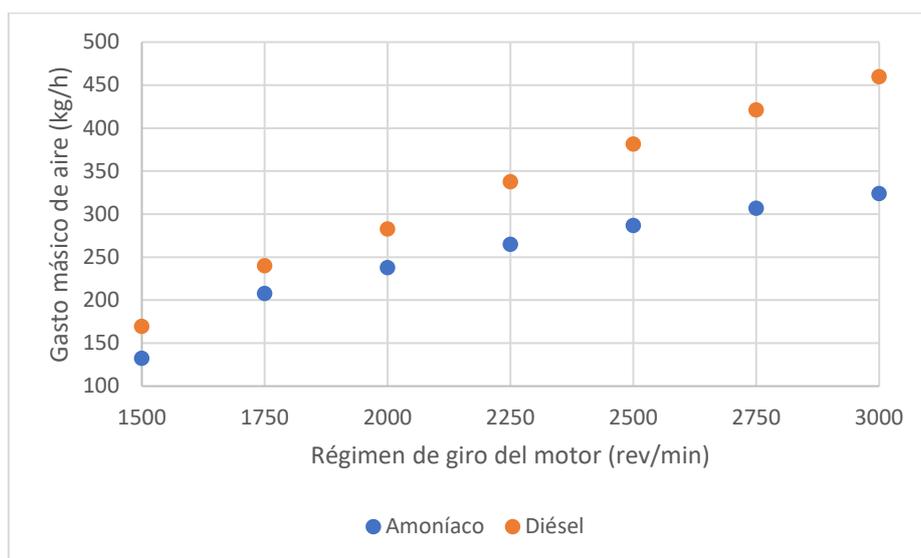
Considerando que la temperatura en el colector de entrada es constante, si la constante Rg es mayor para una mezcla de gases determinada, es necesario aumentar la presión para mantener constante la densidad. La Rg del aire atmosférico es 287 J/kgK, mientras que la Rg de la mezcla estequiométrica aire-amoníaco es 316 J/kgK. Esta es la razón por la que el gasto másico a través de las válvulas es menor en las simulaciones con amoníaco (donde dicho combustible se inyecta en fase gas en el colector de admisión), a pesar de que la presión en el colector de admisión es mayor.

Como se puede observar en la Figura 5.11, es necesario inyectar una mayor cantidad de combustible en las simulaciones con amoníaco para lograr una misma potencia (como se aprecia en la Figura 5.13), en comparación con los casos con diésel. Esto se debe a que el amoníaco tiene un poder calorífico menor que el diésel, lo que significa que proporciona menos energía por unidad de masa.

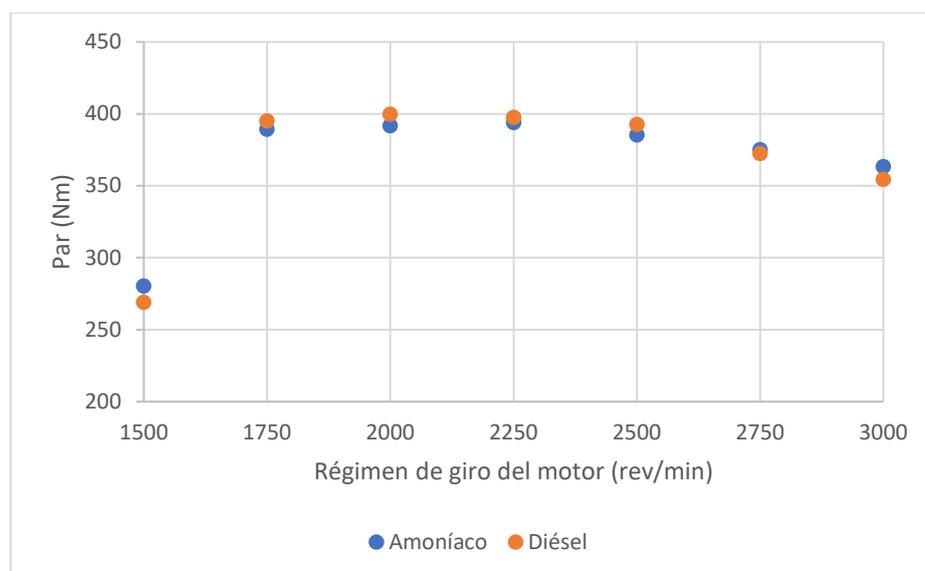


30. Figura 5.11. Amoníaco vs diésel: combustible

En la Figura 5.12, se muestra el gasto másico de aire para los siete puntos de operación con diésel y amoniaco. Como se puede ver en esta figura, el gasto de aire con amoniaco es menor a pesar de que la cantidad de combustible introducida es mucho mayor. Esto es debido a que la relación estequiométrica aire-combustible para el amoniaco (6.05) es menor que para el diésel (14.5).

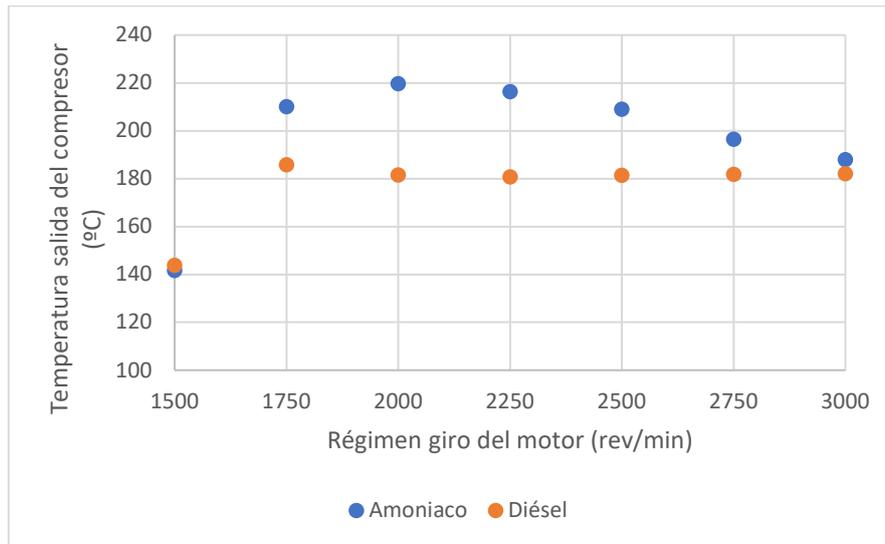


31. Figura 5.12. Amoniaco vs diésel: gasto másico de aire



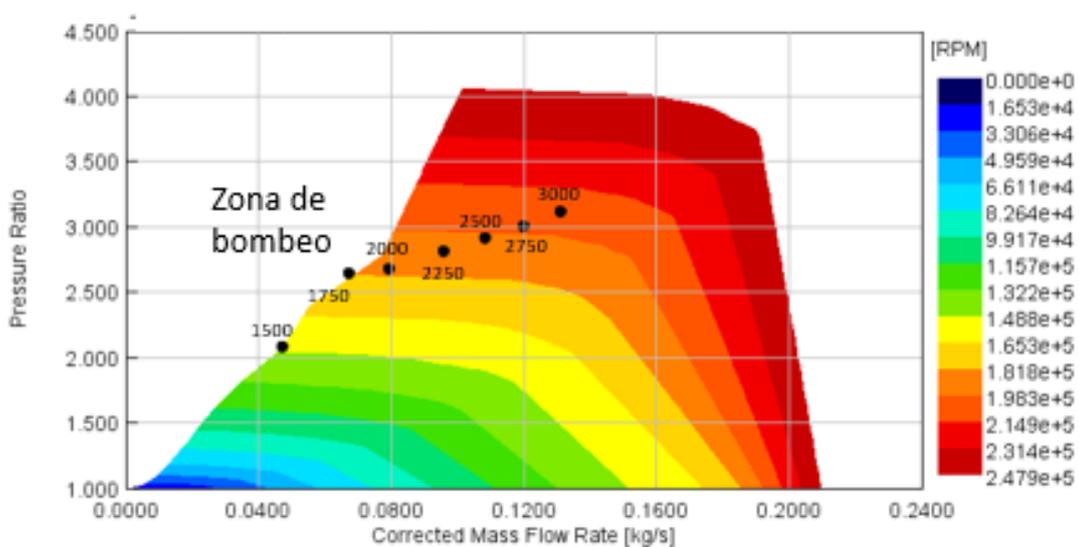
32. Figura 5.13. Amoniaco vs diésel: par del motor

En la Figura 5.14 se muestran los valores de temperatura a la salida del compresor para los siete puntos de operación con diésel y amoniaco. Tal y como se puede apreciar en la figura, la temperatura en los casos con diésel se mantiene por debajo de los 200°C. Sin embargo, en las simulaciones con amoniaco, cuando el motor gira entre 1750 y 2500 revoluciones por minuto, dicha temperatura supera los 200°C. Esto es poco recomendable, ya que, por encima de los 200°C, el aceite que lubrica el compresor puede degradarse y perder sus propiedades, lo que podría ocasionar daños, además del riesgo de rotura de las palas del compresor, construidas en aleación ligera (aluminio).



33. Figura 5.14. Diésel vs amoniaco: temperatura a la salida del compresor

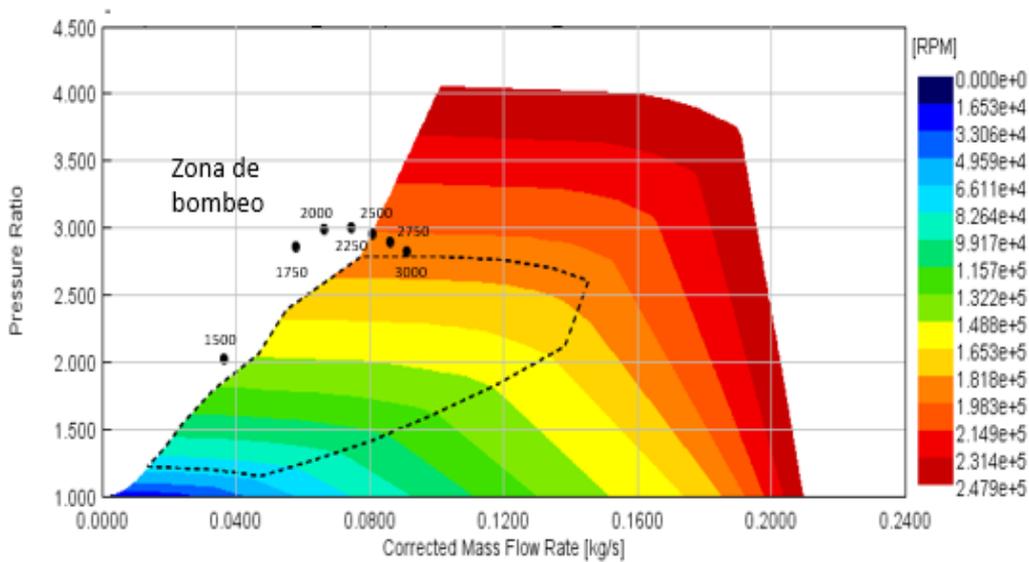
Además, a continuación, se muestra el mapa del compresor con los siete puntos de operación con diésel (Figura 5.15) y con amoniaco (Figura 5.16).



Eje x: Gasto másico corregido a través del compresor (kg/s)
Eje y: Relación de compresión

Barra de colores: Régimen de giro del compresor (rev/min)

34. Figura 5.15. Mapa del compresor: puntos de operación con diésel



Eje x: Gasto másico corregido a través del compresor (kg/s)

Eje y: Relación de compresión

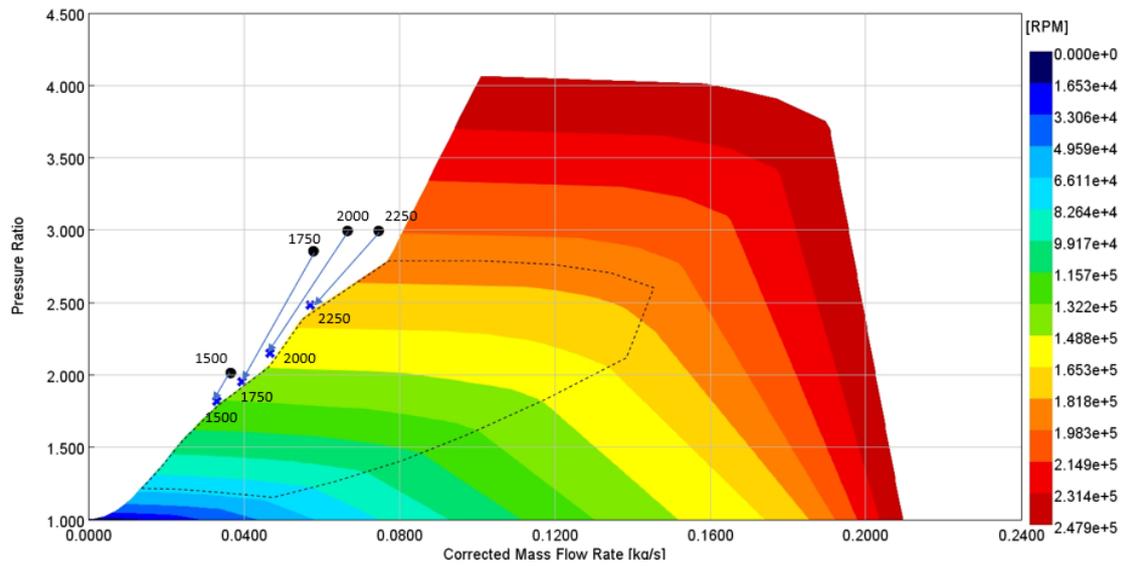
Barra de colores: Régimen de giro del compresor (rev/min)

35. Figura 5.16. Mapa del compresor: puntos de operación con amoniaco

En la Figura 5.15, se puede observar que todos los puntos se encuentran dentro de la zona de operación del compresor, sin ningún punto en la zona de bombeo. Sin embargo, la situación es diferente con amoniaco, ya que cuatro de los puntos de operación se encuentran en la zona de bombeo (Figura 5.16). Esto se debe a que es necesario una mayor relación de compresión para introducir la misma cantidad de aire que en los casos con diésel. Es necesario remarcar que el compresor no puede operar en su zona de bombeo, ya que podría sufrir daños. Por lo tanto, se puede concluir que, con el turbocompresor utilizado, no es posible reproducir la curva de plena carga del motor diésel empleando amoniaco como combustible, entre 1500 y 2250 rev/min.

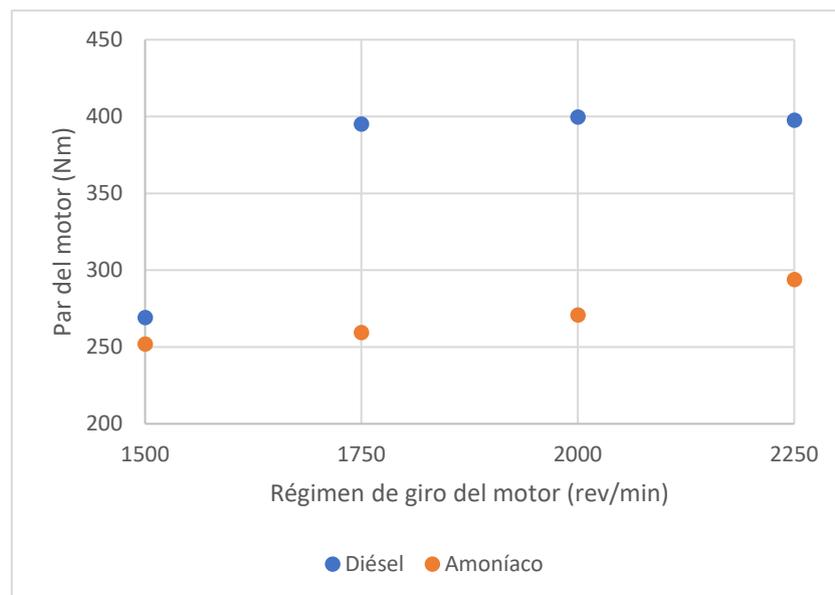
Para conocer el valor máximo de par que se podría alcanzar con amoniaco, se han resimulado los cuatro puntos mencionados para que el compresor opere al límite, justo en su línea de bombeo. Los resultados de estas nuevas simulaciones se presentan en la Figura 5.17, 5.18 y 5.19. En la Figura 5.17, se muestran, sobre el mapa del compresor, los cuatro puntos de operación recalculados (cruces azules sobre la línea de bombeo) y los mismos cuatro puntos antes de ser resimulados (puntos negros en la zona de bombeo).

En la Figura 5.18, se muestra la curva de plena carga con diésel y con amoniaco entre 1500 y 2250 rev/min, tras recalculer los cuatro casos con amoniaco a fin de evitar que el compresor trabaje en bombeo. Se puede apreciar un cambio significativo en comparación con la Figura 5.13, ya que el par del motor con amoniaco es ahora considerablemente menor que con diésel. En concreto, cuando el compresor opera en su límite de bombeo, el par máximo del motor con amoniaco sería entre un 10% y un 55% menor que el par de plena carga con diésel entre 1500 y 2250 rev/min.



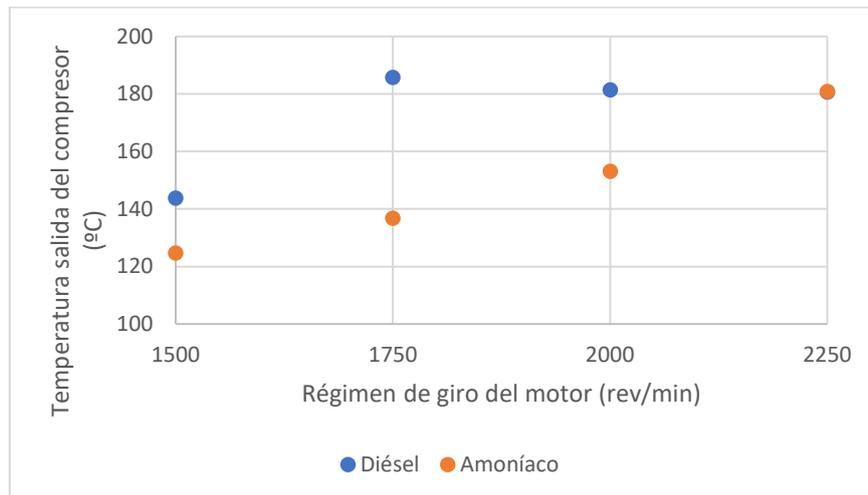
Eje x: Gasto másico corregido a través del compresor (kg/s)
 Eje y: Relación de compresión
 Barra de colores: Régimen de giro del compresor (rev/min)
 Puntos zona de bombeo: puntos negros
 Puntos en el límite de bombeo: cruces azules

36. Figura 5.17: Mapa del compresor con los nuevos puntos de operación con amoníaco



37. Figura 5.18. Par del motor: diésel vs amoníaco tras recalcular los casos con amoníaco para evitar bombeo en el compresor

Por último, en la Figura 5.19, se puede apreciar que, en los casos con amoníaco (una vez recalculados), ya no se alcanzan temperaturas superiores a los 200°C a la salida del compresor, lo cual es fundamental para asegurar que el aceite que lubrica el compresor mantenga sus propiedades.



38. Figura 5.19. Temperatura a la salida del compresor: diésel vs amoníaco tras recalculer los casos con amoníaco para evitar bombeo en el compresor

CAPÍTULO 6 – RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este Trabajo Fin de Grado, se ha construido en GT-Power un modelo 1D de un motor de encendido por compresión de 2 litros turboalimentado. Dicho motor fue instalado en un banco dinamométrico donde fue ensayado usando diésel como combustible. Estos ensayos experimentales con diésel fueron utilizados para calibrar el modelo 1D del motor. La calibración del modelo consistió principalmente en introducir correlaciones a fin de ajustar los fenómenos de pérdida de carga y transmisión de calor en los diferentes volúmenes y conductos que forman parte del motor.

Una vez calibrado el modelo 1D del motor, dicho modelo fue adaptado para simular el motor con amoniaco. Para ello, fue necesario cambiar el tipo de inyección y la relación de compresión, ya que los pistones usados para operar con amoniaco son diferentes a los utilizados en el motor base con diésel. Después de adaptar el modelo, la curva de plena carga del motor diésel fue reproducida empleando amoniaco como combustible.

Tras las simulaciones con amoniaco, se pudo observar que el compresor trabaja en bombeo cuando el motor opera a plena carga entre 1500 y 2250 rev/min. Esto se debe a que con amoniaco se necesita una presión mayor en el colector de admisión para introducir la misma cantidad de aire (debido a la inyección indirecta de amoniaco). Además, en estos puntos de operación, la temperatura a la salida del compresor supera los 200°C, un valor límite para no comprometer la durabilidad de la turbomáquina. A fin de conocer el par máximo con amoniaco, los puntos de plena carga entre 1500 y 2250 rev/min fueron resimulados abriendo la TGV hasta que el compresor operase en su límite de bombeo.

Una vez recalculados estos casos, se pudo observar que, cuando el compresor opera en su límite de bombeo, el par máximo del motor con amoniaco es un 10-55% menor que el par de plena carga con diésel entre 1500 y 2250 rev/min. Así pues, de este modelado preliminar del motor con amoniaco, se puede concluir que, con la turbomáquina del motor base, no es posible reproducir la curva de plena carga usando amoniaco como combustible.

II PRESUPUESTO

CAPÍTULO 7 – PRESUPUESTO

Contenido

7.1. Desglose de costes de equipos y sistemas informáticos

7.2. Desglose de costes de personal

7.3 Presupuesto de la parte experimental

7.4 Presupuesto de la parte computacional

7.5 Presupuesto total

En esta parte del documento se presenta una estimación del coste que ha supuesto el proyecto, siendo dividido en coste de equipos y sistemas informáticos y coste de personal.

Una vez detallados los costes unitarios de cada uno de los elementos utilizados para la realización del proyecto, se realizarán dos presupuestos parciales, por un lado, el de la parte experimental, y por otro el de la parte computacional.

La suma de estos dos será el presupuesto total, al que se añadirá un 8 % en concepto de gastos adicionales e imprevistos a la hora de realizar el proyecto, un 6 % de beneficio industrial a la empresa contratada y el IVA o el Impuesto sobre el Valor Añadido, que corresponde al 21 % de la cantidad final.

7.1. Desglose de costes de equipos y sistemas informáticos

En primer lugar, se tratarán los equipos utilizados tanto para la parte experimental del proyecto como para el estudio computacional realizado. Los costes de estos se estiman por horas de utilización, siendo el precio horario dependiente de su vida útil o período de amortización. En el estudio realizado, se considera que se alcanzará el límite de vida útil antes de la amortización, teniendo los sistemas informáticos una vida útil estimada de unos 3 años y el banco de ensayos, alrededor de 10 años. Por su parte, las horas de utilización de los equipos son alrededor de 1800 al año, ya que los días de trabajo anuales son unos 225, teniendo en cuenta días hábiles menos vacaciones, y la jornada laboral tiene una duración de 8 horas.

La parte experimental ha sido desarrollada en el banco motor formado por los equipos desglosados en la Tabla 7.1. En cuanto al estudio computacional, los sistemas informáticos y las licencias utilizadas se detallan en la Tabla 7.2.

Equipos banco motor

EQUIPO	PRECIO (€)	VIDA ÚTIL [años]	[€/hora]
Banco dinamométrico	155.789,12	10	8,65
Banco de herramientas	3.000	10	0,16
Balanza de combustible	19.020	10	1,05
Caudalímetro	20.000	10	1,11
HORIBA – Mexa One	270.970,51	10	15,05
Sistema de adquisición	31.256,20	10	1,73
Ordenador de sobremesa	950	3	0,18
Puma	34.200	10	1,90
YOKOGAWA DL850V (osciloscopio)	17.890	10	0,99
TOTAL			30,82

4. Tabla 7.1: Coste de equipos del banco de ensayos

Sistemas informáticos y licencias

EQUIPO	PRECIO (€)	VIDA ÚTIL [AÑOS]	[€/HORA]
Ordenador de sobremesa	950	3	0,18
Ordenador portátil	800	3	0,15
Licencia Inca	3.500	3	0,64
Licencia LabView	5.747	3	1,06
Licencia Matlab	1.523	1	0,85
Licencia paquete Office	115	1	0,06

5. Tabla 7.2: Coste de equipos informáticos y licencias

7.2. Desglose de costes de personal

Para el estudio realizado se han necesitado un ingeniero doctor, que es el tutor del trabajo, otro superior, cuyas tareas han sido el seguimiento y ayuda al último, el alumno, que es el autor del presente documento y del estudio.

Aparte de estos tres, todas las horas en las que se ha hecho uso del banco de ensayos ha estado presente un técnico de laboratorio, fundamental para la utilización de este y que se incluye también en el presupuesto.

Un resumen de estos costes se encuentra en la Tabla 7.3.

Personal

PERSONAL	[€/HORA]
Alumno	3,50
Ingeniero doctor	40
Ingeniero superior	20
Técnico de laboratorio	18

6. Tabla 7.3: Coste de personal

7.3 Presupuesto de la parte experimental

Se considera para la elaboración de este presupuesto que todos los equipos se encuentran ya instalados y calibrados, por lo que el tiempo de experimentación contemplado es únicamente el utilizado para ensayos del presente proyecto, y por tanto de amortización. En la parte experimental han participado el técnico de laboratorio y el alumno, y los equipos utilizados son todos los presentes en el banco de ensayos. En la Tabla 7.4 se desglosan los costes asociados a esta parte del proyecto.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES (h)	PRECIO [€/h]	IMPORTE [€]
Alumno	80	3,50	280
Técnico de laboratorio	80	18	1440
Banco de ensayos	80	30,82	2466
Licencia Inca	80	0,64	51.2
Licencia LabView	80	1,06	84.8
TOTAL			4322

7. Tabla 7.4: Presupuesto de la parte experimental del proyecto

7.4 Presupuesto de la parte computacional

Respecto a la parte computacional, se han incluido todas las horas empleadas para recopilar información acerca del estudio realizado, las horas de cálculo de GT-Power y las de tratamiento de datos con Matlab o Excel. Las tareas que se han tenido en cuenta dentro de la parte computacional del proyecto son todas aquellas llevadas a cabo en la oficina y son las que siguen: revisión bibliográfica y búsqueda de información útil para el planteamiento y desarrollo del proyecto y el correcto entendimiento de este; introducción de datos en GT-Power y simulaciones; procesado de resultados de GT-Power y comparación con datos experimentales para la validación de estos; y representación y análisis de resultados obtenidos con Excel. Se ha realizado una estimación de las horas totales dedicadas a esta parte, teniendo en cuenta el personal implicado, los equipos

usados y las instalaciones empleadas, en este caso las oficinas del departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universitat Politècnica de València. Se tiene el desglose de estos costes en la Tabla 7.5.

Descripción	Unidades (h)	Precio (€/h)	Importe (€)
Alumno	500	3,50	1.750
Ingeniero doctor	50	40	2.000
Ingeniero superior	150	20	3.000
Ordenador de sobremesa	300	0,17	51
Licencia GT-Power	250	2,77	692,50
Licencia paquete Office	200	0,06	12
Ordenador portátil	200	0,15	30
TOTAL			7.535,50

8. Tabla 7.5: Presupuesto de la parte computacional del proyecto

7.5 Presupuesto total

Con todo lo detallado anteriormente se termina el presupuesto juntando todos los costes asociados al proyecto, es decir, la suma de los presupuestos parciales y además se añaden los incrementos del 8% en concepto de gastos imprevistos y otro del 6% por el beneficio que se obtiene de la realización del proyecto. Por último, los impuestos, que corresponden al 21% del total calculado.

Presupuesto de ejecución del proyecto es la suma de los gastos de las partes computacional y experimental.

CONCEPTO	IMPORTE (€)
Presupuesto de la parte experimental	4.322
Presupuesto de la parte computacional	7.535,50
TOTAL	11.857,50

9. Tabla 7.6: Presupuesto de ejecución material del proyecto

Si la CMT – Motores Térmicos es contratado por una empresa para realizar este tipo de estudio, se tendría que abonar la ejecución por contrata del proyecto, que se detalla a continuación.

Presupuesto TOTAL

CONCEPTO	IMPORTE [€]
Presupuesto de ejecución material	11.857,50
Imprevistos (8%)	948,60
Beneficio industrial (6%)	711,45
Presupuesto de ejecución por contrata	13.517,55
IVA (21%)	2.838,69
TOTAL	16.356,24

10. Tabla 7.7: Presupuesto total del proyecto

Asciende así el presupuesto total a la cantidad de:

DIECISEIS MIL TRESCIENTOS CINCUENTA Y SEIS EUROS CON VEINTICUATRO CÉNTIMOS.

III PLIEGO DE CONDICIONES

CAPÍTULO 8 - INTRODUCCIÓN Y OBJETO DEL PLIEGO DE CONDICIONES

El pliego de condiciones establece el propósito, el contexto y el alcance de este. Tiene como objetivo dar una visión general de las especificaciones y de los requisitos que deben cumplirse en un proyecto determinado.

Además, su objeto es proporcionar una descripción detallada de los requisitos técnicos, legales y funcionales que deben cumplirse en relación con el proyecto. Este documento establece los estándares que deben seguirse en la ejecución de un proyecto o en la adquisición tanto de los bienes como de los servicios.

La finalidad del pliego es establecer un entendimiento entre las partes involucradas como el comprador o proveedor o como el contratista. Además, busca cubrir las expectativas y necesidades del cliente para que se cumplan de manera satisfactoria y precisa.

CAPÍTULO 9- PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES

Contenido

9.1 Condiciones del área experimental

9.2 Condiciones del puesto de trabajo

9.1 Condiciones del área experimental

En esta parte se describirán cuáles son las condiciones que se deben cumplir en la sala de medidas. Los ensayos deben ser llevados a cabo en un espacio adecuado para ello. En este Trabajo, los ensayos han sido realizados en un banco de pruebas de un motor diésel, donde se encuentran tanto el motor como toda la instrumentación y herramientas de adquisición de datos. En la sala donde se realizan las pruebas se tienen que cumplir una serie de requisitos para que de lugar a un correcto funcionamiento y así evitar riesgos en la seguridad y salud de las personas que trabajen en ella.

La sala debe estar acondicionada y además debe tener un sistema de renovación de aire que funcione por extractores y vías de canalización. Además, al ser el motor una fuente de ruido de intensidad moderada, la sala está aislada acústicamente para evitar que este alto nivel de ruido influya en las instalaciones contiguas, cumpliendo con la norma NBE-CA-82, el motor debe estar apoyado sobre soportes que amortigüen las vibraciones y así no se propaguen por la sala ni por las salas contiguas.

También hay que destacar que como se trabaja con combustibles es necesario un extintor de eficacia 21 A-113B que este bien señalizado y en un lugar accesible y por seguridad

se debe ubicar dentro de la sala un pulsador rojo para activar la parada de emergencia del motor en caso de que ocurra algún fallo o situación peligrosa.

Por último al entrar en la sala se deben cumplir una serie de normas, los ensayos se han de realizar a puerta cerrada, cuando haya algo en la sala en funcionamiento dentro de ella de haber un mínimo de personal, la sala debe disponer de un botiquín para realizar de manera adecuada los primeros auxilios en caso de ser necesarios, si por algún caso se produce derrame de combustible se debe limpiar de manera inmediata, por lo que la sala debe disponer de productos de limpieza y contenedores específicos.

Es importante que se realice un seguimiento de estas normas y se cumplan adecuadamente y durante los ensayos realizados para este Trabajo de Fin de Grado así ha sido.

9.2 Condiciones del puesto de trabajo

Para poder extraer los resultados de los datos experimentales obtenidos de los ensayos en la sala, se ha hecho uso de lo que dice el Real Decreto 488/1997.

El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) establece una serie de requisitos mínimos para el trabajo con pantallas de visualización de datos (PVD). Primero quiero nombrar que la pantalla debe tener un tamaño de diagonal mayor que 14” y una resolución mayor que 640x480, teniendo en cuenta que no tiene que presentar ningún tipo de reflejo que pueda ser molesto para nuestra vista. También hay que tener en cuenta que la altura del asiento debe ser ajustable adaptándose a cualquier superficie de trabajo, es conveniente que la espalda esté en todo momento en contacto con el respaldo.

Las dimensiones de la mesa han de ser suficientemente grandes para poder colocar el equipo de sobremesa, nuestro equipo portátil, además de poder trabajar con apuntes u otras herramientas.

Respecto a las condiciones del entorno, como la iluminación y ruido, se recomiendan condiciones de temperatura, humedad y corriente adecuadas para el puesto de trabajo de las características del utilizado, una oficina concretamente. La temperatura debe estar comprendida entre 17°C y 27°C, mientras tanto la humedad de estar entre el 30% y el 70% y puede ser controlada por sistema de refrigeración/calefacción a través del aire que expulsa. Además, tiene que haber una buena recirculación del aire con el objetivo de prevenir los malos olores y tener un ambiente cargado en exceso.

La iluminación puede clasificarse como natural o artificial en función de los horarios en los que se utilice el espacio de trabajo o la cantidad de ventanas que haya y su orientación. Por último, el edificio en el que se realiza el Trabajo debe disponer de vías de evacuación y salidas de emergencia por si se diera el caso de que fueran necesarias. Dentro de las emergencias se incluyen los incendios para los que el edificio debe disponer de extintores y mangueras siempre cumpliendo la normativa actual y respetando las fechas de revisión, realizadas por las autoridades correspondientes y su caducidad.

CAPÍTULO 10- PLIEGO DE CONDICIONES PARTICULARES

Contenido

10.1. Puesta en marcha, apagado y mantenimiento

10.2. Equipos informáticos

10.1 Puesta en marcha, apagado y mantenimiento

Tanto en la puesta en marcha como el apagado del banco motor utilizado se realiza por una sucesión de pasos, empezando por poner la sala en modo de operación para activar la refrigeración y recirculación de aire. También se deben activar todos los sistemas de adquisición. Inca, LabView, Puma, la balanza de combustible, las fuentes de alimentación eléctrica, la circulación de agua, además de los amplificadores de señal.

Una vez encendidos todos los sistemas que se van a usar en la sala, normalmente a través del software Puma se arranca el motor. Se escriben los valores y el tiempo deseado para que el motor llegue al punto.

Tras haber realizado los correspondientes ensayos, es momento de apagar la instalación. Para ello, primero se debe ir reduciendo la carga y las revoluciones del motor, para que así el apagado no sea violento. Una vez reducido esto, se pone desde el software de Puma el ralentí, para después apagar el motor. En cuanto al apagado de las instalaciones se realiza de la misma manera que el encendido, accionando los correspondientes interruptores.

Para finalizar con este apartado se hablará del mantenimiento, es una parte fundamental en la prevención de riesgos tanto en la sala como en las personas, además ayuda a la durabilidad de los sistemas utilizados.

10.2 Equipos informáticos

Para la realización de este Trabajo se han utilizado distintos tipos de software dentro de equipos informáticos.

Todos los softwares han sido adquiridos por la universidad o por el propio departamento y se utilizan de acuerdo con las licencias de que se disponen. Los programas utilizados han sido el Office 365, incluyendo Word, Excel y Power Point y GT-Power, incluyendo GT-Ise y GT-Post, ambos versión v2020.

CAPÍTULO 11- BIBLIOGRAFÍA

1. Almodí Coello, G. (2022). *El sector del automóvil en España, Importancia, situación actual y futura*.
2. Prof. F. Payri & Prof. J. M. Desantes, *Motores de combustión interna alternativos*. Editorial Reverté.
3. Martínez, J. M. L. (1998). *Recirculación interna de gases de combustión en motores diesel sobrealimentados* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
4. Villamar, C. G., Fygueroa, S. J., & Martín, M. J. (2009). *Influencia de Algunos Parámetros sobre el Ciclo de un Motor de Encendido por Compresión*. Información tecnológica, 20(1), 67-72.
5. Basté González, J. (2013). *Determinación del comportamiento de los componentes contaminantes en el sistema de alimentación Diesel*. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 22(4), 65-68.
6. Díez Lorenzo, I. (2022). *Motores propulsados por amoníaco e hidrógeno como combustibles*.
7. Acosta, J., & Torrado, R. (1990). *Funcionamiento del motor diesel*.
8. Soriano, A., & Antonio, J. (2016). *Pistón, biela, cigüeñal y distribución en los motores*.
9. Traslaviña, P., Torrado, R., Méndez, J., & Martínez, H. (1982). *Motores Diesel*.
10. Diesel & Gas Turbine Worldwide Catalog. Diesel y Gas Turbine Publications, 1969-2009
11. Lavoie, G. A., Ortiz-Soto, E., Babajimopoulos, A., Martz, J. B., & Assanis, D. N. (2013). Thermodynamic sweet spot for high-efficiency, dilute, boosted gasoline engines. *International Journal of Engine Research*, 14(3), 260-278.
12. Lhuillier, C., Brequigny, P., Contino, F., & Mounaïm-Rousselle, C. (2020). Experimental study on ammonia/hydrogen/air combustion in spark ignition engine conditions. *Fuel*, 269, 117448.
13. Núñez, C. E. (2007). Relaciones de conversión entre densidad básica y densidad seca de madera. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 9(1), 44-50.
14. Roza Mendieta, C. P., & Hernández Corredor, O. J. (2023). *Competitividad de Colombia como productor y exportador de hidrógeno verde y su derivado amoníaco verde*.