



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

Trabajo de fin de grado de Ingeniería aeroespacial

Análisis de un motor novedoso de pistones opuestos para su utilización como *Range Extender*

Autor: José Luis Galiana Amorós

Tutor: Francisco J. Arnau

Cotutor: Alejandro Gómez Vilanova

12 de septiembre de 2019

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todas aquellas personas que han sido un gran apoyo a lo largo de este grado. Han significado una ayuda de valor incalculable que me ha hecho crecer en muchos ámbitos.

Por una parte, gracias a mis padres por no solo apoyarme, sino animarme a tomar esta aventura, y a mi actual pareja María por darme valor cada día.

También agradecer a Chema, mi buen amigo, compañero de piso y de estudios, que ha sido un apoyo constante y un ejemplo de superación.

Agradecer a los responsables de este proyecto, en especial a Paco y Álex, por tenerme en cuenta y ayudarme en todo lo posible. Gracias a todos por esta oportunidad.

Resumen

La situación actual respecto a las emisiones de los vehículos, los ciclos WLTC y la concienciación de la sociedad está impulsando, entre otros, los vehículos híbridos. Estos vehículos disponen de un motor eléctrico y un motor de combustión interna alternativo. Precisamente, el motor de InnEngine trata de ser una mejor opción que la competencia en la parte MCI de un motor híbrido.

En este documento se analizan distintos puntos para comprobar la efectividad del motor de InnEngine. En primer lugar se describe dicho motor, detallando el actuador que modifica la posición de los pistones de cada cilindro. A continuación, debido a la necesidad de buscar una alternativa a los estudios experimentales, se introduce VEMOD, la herramienta utilizada para la realización de estudios y el modelo preparado para simular el motor. Por último, se presentan y analizan los estudios que se han realizado referentes a las posiciones mencionadas, con el objetivo de comprobar la efectividad de las mismas para aumentar el rango de funcionamiento del grupo motor, además de los habituales estudios de presión, grado de carga...

Resum

La situació actual respecte a les emissions dels vehicles, els cicles WLTC i la conscienciació de la societat està impulsant, entre altres, els vehicles híbrids. Aquests vehicles disposen d'un motor elèctric i un motor de combustió interna alternatiu. Precisament, el motor de InnEngine tracta de ser una millor opció que la competència en la part MCIA d'un motor híbrid.

En aquest document s'analitzen diferents punts per a comprovar l'efectivitat del motor de InnEngine. En primer lloc es descriu aquest motor, detallant l'actuador que modifica la posició dels pistons de cada cilindre. A continuació, a causa de la necessitat de buscar una alternativa als estudis experimentals, s'introdueix VEMOD, l'eina utilitzada per a la realització d'estudis i el model preparat per a simular el motor. Finalment, es presenten i analitzen els estudis que s'han realitzat referents a les posicions esmentades, amb l'objectiu de comprovar l'efectivitat de les mateixes per a augmentar el rang de funcionament del grup motor, a més dels habituals estudis de pressió, grau de càrrega.

Abstract

The current situation regarding vehicle emissions, WLTC cycles and society awareness is driving to hybrid vehicles, among other solutions. This kind of vehicle have two engines, an internal combustion engine (ICE) and an electric engine. InnEngine is trying to make their new engine the best among the internal combustion engines which are part of a hybrid vehicle.

This document discusses different points to check the effectiveness of the InnEngine new engine. First, this engine is described, detailing the actuator that modifies the position of the pistons of each cylinder. Due to the need to find an alternative to experimental studies, VEMOD is introduced as a useful virtual tool to study the new engine, and the model that has been used. Lastly, different studies are shown. In those studies, some characteristics of the engine have been analyzed, such us the different positions, pressure ranges and different loads, in order to conclude the viability of the engine as a range extender.

Índice

| | |
|--|-----------|
| Agradecimientos | I |
| Resumen | II |
| Índice de contenidos | VI |
| Índice de figuras | VIII |
| Índice de tablas | X |
| | |
| I Memoria | 1 |
| | |
| 1. Introducción | 2 |
| 1.1. Objeto | 2 |
| 1.2. Antecedentes | 2 |
| 1.3. Objetivo | 3 |
| | |
| 2. Contexto técnico y medioambiental | 4 |
| 2.1. El sector automovilístico | 4 |
| 2.2. Estado de los MCIA | 6 |
| 2.3. El estado del híbrido | 8 |
| | |
| 3. 3S ICE - El motor de 3 tiempos | 11 |
| 3.1. ¿En qué consiste? | 11 |
| 3.2. Funcionamiento | 15 |
| 3.2.1. Los cilindros del motor | 17 |
| 3.2.2. Los efectos VPT y VCR - Actuador | 17 |
| | |
| 4. VEMOD - Virtual Engine Model | 23 |
| 4.1. Introducción a VEMOD | 23 |
| 4.2. Modelos utilizados en VEMOD | 24 |
| 4.2.1. Dinámica del gas - Modelo 1D | 25 |
| 4.2.2. Condiciones de contorno | 26 |
| 4.2.3. Modelo de combustión | 27 |
| 4.2.4. Submodelo de transmisión de calor en cilindro | 28 |
| 4.2.5. Modelado del proceso de barrido | 29 |
| 4.2.6. Otras características | 30 |
| 4.3. Configurando casos en VEMOD | 30 |
| | |
| 5. El motor 3S ICE en VEMOD | 33 |
| 5.1. Descripción detallada del modelo | 33 |
| 5.2. Primeros pasos del proyecto - Debugging | 37 |
| 5.3. Primeros casos del modelo y validación | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 6. Estudios y baterías de casos | 45 |
| 6.1. Introducción a los estudios | 45 |
| 6.2. Elección del ratio de mezcla | 45 |
| 6.3. Estudio de sobrealimentación de la admisión | 47 |
| 6.4. Estudio de las posiciones del actuador | 58 |
| 6.5. Estudio para la inclusión de inyección directa | 61 |
| 7. Conclusión | 72 |
| 7.1. Conclusiones de los estudios | 72 |
| 7.2. Uso como <i>Range Extender</i> | 73 |
| 7.3. Futuros proyectos | 73 |
| 8. Presupuesto | 74 |
| 8.1. Actividades realizadas | 74 |
| 8.1.1. Ensayos experimentales | 74 |
| 8.1.2. Desarrollo de código e interfaz y realización de los estudios | 75 |
| 8.1.3. Análisis, tratamiento y redacción de los resultados y la información | 77 |
| 8.2. Costes unitarios | 77 |
| 8.2.1. Infraestructura y equipos | 78 |
| 8.3. Licencias | 79 |
| 8.3.1. Costes indirectos | 80 |
| 8.3.2. Recursos humanos | 80 |
| 8.4. Cálculo de los presupuestos | 80 |
| 8.4.1. Presupuesto por actividad | 80 |
| 8.4.2. Presupuesto total | 82 |
| | |
| II Anexos | 85 |
| A. Anexo | 86 |
| A.1. Valores invariables | 86 |
| A.1.1. Valores de desfase para cada posición de actuador | 86 |
| A.1.2. Valores de duración de la combustión y adelanto de la combustión para las combinaciones de velocidad de giro y posición del actuador | 86 |
| A.2. Casos | 87 |
| A.2.1. Casos para la validación | 87 |
| A.2.2. Casos para la selección del ratio de mezcla | 88 |
| A.2.3. Casos para el estudio de sobrealimentación | 91 |
| A.2.4. Casos para el estudio de posición - velocidad de giro | 101 |
| A.3. Casos para la comparación entre inyección directa y carburadores | 103 |

Índice de figuras

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Esquema representativo de un DOC | 7 |
| 2. | Esquema representativo de un DPF | 7 |
| 3. | Reacciones en un TWC | 8 |
| 4. | Ejemplo de coche híbrido | 9 |
| 5. | Funcionamiento de un coche híbrido con carga | 9 |
| 6. | Diseño por ordenador del motor 3S ICE de InnEngine | 11 |
| 7. | Alzado - Dibujos del 3S ICE | 12 |
| 8. | Planta - Dibujos del 3S ICE | 14 |
| 9. | Planos del motor | 16 |
| 10. | Numeración y orden de acción de los cilindros | 17 |
| 11. | Representación del motor que permite observar ambos discos-leva | 19 |
| 12. | Aperturas de lumbreras en la posición 0 mm | 20 |
| 13. | Aperturas de lumbreras en la posición 16 mm | 20 |
| 14. | Volumen de la cámara en la posición 0 mm | 21 |
| 15. | Volumen de la cámara en la posición 16 mm | 21 |
| 16. | Volumen en función de la posición | 22 |
| 17. | Variación del ratio de compresión con la posición | 22 |
| 18. | Módulos utilizados en VEMOD. | 24 |
| 19. | Conexión de múltiples elementos 1D. | 27 |
| 20. | Menú con las opciones de un carburador - VEMOD | 31 |
| 21. | Menú del bloque motor - VEMOD | 32 |
| 22. | Ventana de configuración de los casos - VEMOD | 32 |
| 23. | Modelo 1D del motor 3S ICE de InnEngine en VEMOD | 36 |
| 24. | Ley de combustión | 38 |
| 25. | Par convergiendo a lo largo de los ciclos | 40 |
| 26. | Presión convergiendo a lo largo de los ciclos | 41 |
| 27. | Valores de presión en el cilindro 1 para el punto de 1000 rpm, par = 60 N·m | 43 |
| 28. | Valores de presión en el cilindro 1 para el punto de 2000 rpm, par = 60 N·m | 44 |
| 29. | Diagrama de flujo de un motor de 2T, válido para el 3S ICE | 46 |
| 30. | Comparación de consumo específico para los ratios de mezcla 0 (barrido), 1 (mezcla) y 0.5 respectivamente | 48 |
| 31. | Comparación de potencia para los ratios de mezcla 0 (barrido), 1 (mezcla) y 0.5 respectivamente | 49 |
| 32. | Comparación de par generado para los ratios de mezcla 0 (barrido), 1 (mezcla) y 0.5 respectivamente | 50 |
| 33. | Consumo específico para distintas posiciones | 51 |
| 34. | Par generado para distintas posiciones | 52 |
| 35. | Potencia efectiva producida para distintas posiciones | 53 |
| 36. | Temperaturas máximas en el interior del cilindro | 54 |
| 37. | Presiones máximas en el interior del cilindro para distintas posiciones | 55 |
| 38. | Rendimiento de retención para distintas posiciones | 56 |
| 39. | Potencia neta | 59 |
| 40. | Par generado por el motor | 60 |

| | | |
|-----|---|----|
| 41. | Consumo específico | 61 |
| 42. | Condiciones en el cilindro | 63 |
| 43. | Rendimiento de retención | 64 |
| 44. | Distintos ratios representativos de la renovación de la carga (1) | 65 |
| 45. | Distintos ratios representativos de la renovación de la carga (2) | 66 |
| 46. | Comparación de la potencia generada entre el motor con carburadores y con inyectores | 67 |
| 47. | Comparación del par generado entre el motor con carburadores y con inyectores | 68 |
| 48. | Comparación del consumo específico del motor con carburadores y con inyectores | 69 |
| 49. | Comparación del rendimiento de retención entre el motor con carburadores y con inyectores | 70 |

Índice de cuadros

| | | |
|-------|--|-----|
| 1. | Elementos del motor | 13 |
| 2. | Parámetros base para el uso de la ley de Wiebe. | 28 |
| 3. | Valores de TOC y SOC en radianes para todas las posiciones y velocidades de giro incluidas en el estudio | 29 |
| 4. | Etiquetas utilizadas en las condiciones iniciales | 33 |
| 5. | Valores geométricos de los conductos | 34 |
| 6. | Características de los elementos 0D | 34 |
| 7. | Algunos de los primeros casos realizados con la interfaz | 39 |
| 8. | Valores de inicialización comunes para todos los casos presentados en el documento | 39 |
| 9. | Casos usados para la validación del modelo en interfaz | 41 |
| 10. | Batería de casos utilizados par el estudio del ratio de mezcla | 46 |
| 11. | Batería de casos utilizados par el estudio de la viabilidad de sobrealimentación. | 47 |
| 12. | Casos para el estudio Posición - Velocidad de giro. $P_{inlet} = 1,15bar$ | 58 |
| 13. | Presupuesto de la actividad 1 - Montaje de la sala. | 80 |
| 14. | Presupuesto de la actividad 2 - Ensayos experimentales. | 81 |
| 15. | Presupuesto de la actividad 3 - Desmontaje de la sala. | 81 |
| 16. | Presupuesto de la actividad 4 - Principios del modelo. | 81 |
| 17. | Presupuesto de la actividad 5 - Ajuste del modelo. | 81 |
| 18. | Presupuesto de la actividad 6 - Cálculo de los estudios. | 82 |
| 19. | Presupuesto de la actividad 7 - Conclusiones y desarrollo. | 82 |
| 20. | Presupuesto de las licencias | 82 |
| 21. | Importe bruto | 83 |
| 22. | Presupuesto total | 83 |
| A.1. | Desfases aplicados por el actuador según la posición | 86 |
| A.2. | Valores de TOC y SOC en radianes para todas las posiciones y velocidades de giro incluidas en el estudio | 86 |
| A.3. | Casos usados para la comprobación de la interfaz | 87 |
| A.4. | Casos usados para la validación del modelo en interfaz | 87 |
| A.5. | Casos de la posición 2, ratio 0, para la elección de ratio de mezcla | 88 |
| A.6. | Casos de la posición 2, ratio 0.5, para la elección de ratio de mezcla | 89 |
| A.7. | Casos de la posición 2, ratio 1, para la elección de ratio de mezcla | 90 |
| A.8. | Casos posición 0 para estudio de sobrealimentación (1) | 91 |
| A.9. | Casos posición 0 para estudio de sobrealimentación (2) | 92 |
| A.10. | Casos posición 4 para estudio de sobrealimentación (1) | 93 |
| A.11. | Casos posición 4 para estudio de sobrealimentación (2) | 94 |
| A.12. | Casos posición 8 para estudio de sobrealimentación (1) | 95 |
| A.13. | Casos posición 8 para estudio de sobrealimentación (2) | 96 |
| A.14. | Casos posición 12 para estudio de sobrealimentación (1) | 97 |
| A.15. | Casos posición 12 para estudio de sobrealimentación (2) | 98 |
| A.16. | Casos posición 16 para estudio de sobrealimentación (1) | 99 |
| A.17. | Casos posición 16 para estudio de sobrealimentación (2) | 100 |
| A.18. | Casos estudio de posición - velocidad de giro (1) | 101 |

| | |
|--|-----|
| A.19.Casos estudio de posición - velocidad de giro (2) | 102 |
| A.20.Casos de inyección directa (1) | 103 |
| A.21.Casos de inyección directa (2) | 104 |
| A.22.Casos de carburadores (1) | 105 |
| A.23.Casos de carburadores (2) | 106 |

Parte I
Memoria

1. Introducción

En este documento recoge la memoria pertinente al trabajo de fin de grado realizado por José Luis Galiana Amorós, titulado en el Grado de Ingeniería Aeroespacial en la Escuela Técnica Superior de Diseño (UPV) entre los años 2015 y 2019. Dicho trabajo se ha desarrollado en colaboración y bajo la supervisión del Centro de Motores Térmicos de la Universitat Politècnica de València.

1.1. Objeto

La creciente preocupación y concienciación de la población respecto al cuidado del medio ambiente, especialmente en relación a las emisiones de (CO_2) proveniente de vehículos, junto a las nuevas políticas y leyes contra estas emisiones han impulsado el interés por los coches eléctricos y los coches híbridos. Este aumento de interés genera un nuevo campo de estudio y una nueva oportunidad de mercado para diversas empresas, como es el caso que atañe a este proyecto. InnEngine está desarrollando un novedoso motor de dos tiempos de gasolina con características innovadoras cuyo objetivo es formar parte del grupo motor de un vehículo híbrido, aumentando el rango en el que el vehículo actúa teniendo como principal motor el eléctrico.

En este documento se plasman los estudios, descripciones y análisis referentes a este nuevo motor y a las herramientas utilizadas para su estudio.

1.2. Antecedentes

El ambiente de leyes contra la contaminación y regulación de las emisiones reales en conducción de los vehículos no solo complica los sistemas de pos-tratamiento del vehículo, sino que también complica enormemente los cálculos y herramientas necesarios para llevar a cabo el trabajo ingenieril del mismo. Las nuevas tecnologías e ideas que aparecen con el fin de reducir las emisiones implican numerosos factores a tener en cuenta durante los cálculos de combustión, de emisiones, etc.

Factores como los gases recirculados, adelantos/atrasos de aperturas o cierres de válvulas, turbocompresores y sobrealimentación, DOC, TWC... por separado no implican muchísimo esfuerzo de cálculo. Pero a medida que se hacen más estrictas las leyes contra las emisiones contaminantes se necesita combinar sus usos y buscar nuevas tecnologías. Cuantos más elementos necesita el motor, más compleja es la ingeniería y la simulación del mismo, además

de elevar enormemente el precio de todo el proceso y, por tanto, del producto final.

Por otra parte, los vehículos completamente eléctricos están lejos de llegar a un punto de diseño tal que sustituir la flota actual de vehículos con MCI sea viable, y aún más lejos de que la generación de energía necesaria para mover la nueva .

Entre las distintas soluciones, hay una que parece la respuesta obvia, crear una nueva tipología de motor. Obviamente, esta respuesta tiene implicaciones complejísimas, partiendo de que ha de aparecer una idea nueva, una que permita por sí misma reducir las emisiones sin tener que generar tanta tecnología complementaria. Pero por compleja que sea, quizá es el camino a seguir.

InnEngine presenta un motor de 2 tiempos, lo que implica que no tiene pérdidas de bombeo, compacto, barato, sin vibraciones... y con una peculiaridad: los cilindros contienen una cámara de combustión formada por pistones opuestos, cuyo volumen se ve afectado por la posición de un actuador. Este motor permite, en teoría, reducir el consumo al combinarse en un motor híbrido a la vez que mantiene la sencillez mecánica de los motores de 2 tiempos en comparación a los de 4 tiempos.

1.3. Objetivo

El objetivo final del proyecto es comprobar la viabilidad del motor 3S ICE de InnEngine como *Range Extender* mediante el estudio del funcionamiento del mismo en diversas condiciones de grado de carga, presión, revoluciones por minuto y, más importante, posición del actuador, que es el añadido que hace interesante al motor. Para ello, se ha llevado a cabo una lista de objetivos a lo largo de la cual se ha ido avanzando:

1. Preparación de un modelo funcional y representativo del motor en la herramienta diseñada en el CMT: VEMOD.
2. Validación de los resultados del modelo en VEMOD con puntos experimentales obtenidos en banco de ensayo con anterioridad durante la estancia del motor modelo en el centro.
3. Preparación de diversas baterías de casos que permitan obtener una amplia base de datos.
4. Análisis de los datos proporcionados por el modelo para comprobar el funcionamiento del motor en distintas condiciones, determinando la combinación idónea para el funcionamiento como *range extender*.

2. Contexto técnico y medioambiental

Es de sobra conocido que la situación medioambiental actual necesita cambiar la forma de consumo de la sociedad en muchos aspectos. Este mismo verano han empezado a surgir noticias estableciendo que quedan menos de dos años para que el cambio climático sea irreversible. La única posibilidad de que haya una opción real de llevar a cabo la hazaña de recuperar la salud del planeta que tanto ha dado por la especie humana es un trabajo conjunto entre los distintos sectores responsables de la contaminación.

Según el programa 21 de las Naciones Unidas [1] la mejor manera de llevar a cabo esta colosal tarea es que cada acción sea lo más atractiva al público posible. Las Naciones Unidas desarrollan en dicho programa la idea de **desarrollo sostenible**. Este consiste en la unión entre tres pilares importantes: el social, el económico y el ecológico. Para que la sociedad se comprometa con el medio ambiente, los tres pilares han de unirse.

Si se juntan el aspecto social y el económico en un producto, tienes un producto al alcance de la mayor parte de la población, **equitativo**. Si juntas el aspecto ecológico y económico, tienes un producto limpio y atractivo en precio, es decir, **viable** para el bolsillo y el planeta. Por último, si unes los aspectos ecológicos y sociales, creando concienciación, generas actitudes **soportables** para el medio ambiente. Cuando unes un producto al alcance de todos, con viabilidad económica y ecológica con sociedades concienciadas, con el tiempo acabará apareciendo el **desarrollo sostenible**.

El problema es obvio: la sociedad se ha acostumbrado a unos estándares de comodidad a un coste determinado, y salir de esa zona de *confort* es complejo. De ahí que sea extremadamente necesario aunar los 3 factores con un cuarto factor: que la tecnología desarrollada para llevar esto a cabo no suponga un paso atrás. La sociedad no está dispuesta a pagar lo mismo o más por vehículos con peores prestaciones o que tengan un mayor coste en su manutención.

El sector ingenieril tiene la responsabilidad de llevar a cabo la ardua tarea de generar soluciones para las tecnologías existentes o idear nuevas tecnologías que se incluyan en las ideas de desarrollo sostenible, a la vez que tratan de mantener precios competitivos que permitan su accesibilidad a la mayor parte de la población.

2.1. El sector automovilístico

Dentro del sector automovilístico, esta responsabilidad se traduce en reducir el consumo de combustible, reducir las emisiones producidas por vehículos MCIA, buscar alternativas

a los motores de combustibles fósiles mediante los vehículos híbridos (en este documento se refiere únicamente a híbridos de motor térmico + motor eléctrico) o utilizar vehículos eléctricos.

Cada una de estas misiones tiene sus propios problemas:

- La reducción de consumo tiene un límite con la tecnología actual si se quiere mantener los niveles de prestaciones habituales de hoy en día.
- Las leyes contra las emisiones empujan a los fabricantes a exprimir tanto las soluciones activas como las pasivas. Las soluciones activas son aquellas que actúan para evitar la formación de sustancias contaminantes, como utilizar combustibles de calidad u optimizar el ciclo de funcionamiento para obtener más prestaciones con un consumo menor. Por otra parte, las soluciones pasivas se refieren a aquellas que se utilizan para eliminar las sustancias contaminantes una vez se han formado, como el uso de los distintos sistemas de pos-tratamiento
- Los motores eléctricos tienen un buen papel en el futuro de la automoción, pero a día de hoy su inclusión parece inviable. Diversos estudios apoyan que el coche eléctrico supone al usuario una coste total anual mayor que el híbrido o regular [2]. Además, la producción de la energía eléctrica necesaria y la capacidad de almacenarla en el vehículo presentan problemas adicionales, puesto que hoy en día la mayor parte de esa producción depende de energías no renovables y las baterías siguen en desarrollo[3].
- Por último, los vehículos híbridos plantean problemas principalmente de espacio, tamaño y peso. Los vehículos híbridos incorporan, además de los sistemas que acompañan a un MCIA, aquellos que se necesitan para hacer funcionar el motor eléctrico, como las baterías o la estación de carga. Esto es ya un problema de por sí, pero además hay que añadir el hecho de que se necesita mayor potencia para mover el vehículo, de manera que en ciertos momentos de la conducción el gasto podría ser mayor.

A día de hoy, los sistemas de pos-tratamiento en motores de combustión son la solución más extendida. A largo plazo, se está tratando de situar el coche eléctrico como la elección por defecto, buscando tecnologías que lo hagan viable y, sobre todo, formas de generar energía eléctrica que no conlleven un consumo de combustibles fósiles, pues de lo contrario no se ganaría nada.

De esta manera, la opción más viable a corto-medio plazo parecen los vehículos híbridos. La hibridación del grupo motor supone diversos problemas tal y como se ha comentado, pero si se superan los problemas de espacio y peso que supone incluir dos motores con sus sistemas complementarios puede obtenerse una solución efectiva, a falta de buscar la viabilidad económica de la misma.

2.2. Estado de los MCIA

Tanto los motores de gasolina como los motores diésel están cargados de sistemas que tratan de evitar la emisión de contaminantes, aunque cada uno prioriza el uso de unos u otros sistemas. Esto se debe a que cada uno tiene unas emisiones distintas. Los motores de encendido por compresión (MEC, diésel) destaca la emisión de óxidos de nitrógeno NO_x , donde el NO_2 es el más tóxico y el segundo más común en las emisiones, tras el NO . En los motores de encendido provocado (MEP, gasolina) predominan las emisiones de monóxido de carbono (CO). Esto no significa que el otro tipo de motor no emita el resto de contaminantes, simplemente cambian las proporciones. Además, ambos motores emiten hidrocarburos (aunque en MEC son muy bajos), humo y emisión de partículas y emisiones de efecto invernadero (como el CO_2).

Por otra parte, en la clasificación motores de 4t (cuatro tiempos) y motores de 2t (dos tiempos), ambos tienen implicaciones contaminantes, aunque el segundo grupo no entra en el mercado de los turismos. Por lo general, los motores de 2t se aplican en vehículos pequeños como ciclomotores y herramientas de hogar a motor, o se aplican en maquinarias de grandes dimensiones como instalaciones industriales o grandes embarcaciones. Los motores de dos tiempos no suelen tener un gran interés en el estudio de motores de automoción. Son los motores 4t los que dominan el mercado de los turismos, todos los esfuerzos se dedican a tratar de reducir las emisiones que producen mediante sistemas de pos-tratamiento o sistemas activos.

Entre algunos de los sistemas que se utilizan para tratar de evitar las emisiones se encuentran la recirculación de gases de escape y la inyección directa, como ejemplos de soluciones activas, y los catalizadores de tres vías (TWC), los catalizadores de oxidación (DOC), filtros de partículas (DPF)... como ejemplos de soluciones pasivas. Hay una gran cantidad de estos elementos, y suponen una carga de peso y espacio importante para el motor.

- El DOC o catalizador de oxidación diésel [4] es un sistema de pos-tratamiento constituido por un monolito cerámico de cordierite típicamente, cuyo catalizador está formado por metales nobles como el platino y el paladio. El funcionamiento del DOC consiste en hacer pasar los gases de escape por una superficie en forma de panel de abeja que da lugar a mucha superficie de contacto con los catalizadores, acelerando la reacción de distintos componentes de los gases con los metales que forman el catalizador, reduciendo así las sustancias contaminantes. Funciona especialmente bien con los hidrocarburos y el monóxido de carbono (HC y CO), y es de gran importancia en la pelea por reducir las emisiones de NO .
- El DPF o filtro de partículas diésel [5] es otro sistema de pos-tratamiento incluido en los motores diésel cuya función es, tal y como su nombre indica, filtrar las partículas según su tamaño y el hollín que acompañan a los gases de escape. Este proceso se lleva a cabo en un elemento similar al DOC, un filtro cerámico con forma de panel de abeja que da

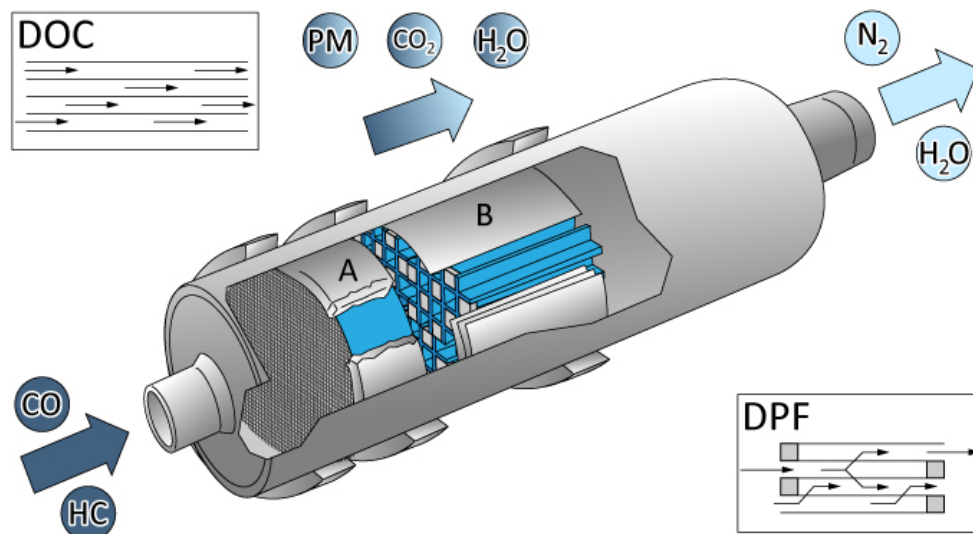


Figura 1: Esquema representativo de un DOC

lugar a una gran superficie de contacto, pero no lleva a cabo reacciones químicas (no tiene catalizadores) sino que simplemente atrapan las partículas. Suele aparecer después del DOC. Uno de los principales problemas de los DPF es que necesitan limpiarse. Esto se lleva a cabo mediante un proceso de regeneración para el cual el DPF ha de alcanzar una temperatura de más de 600°C , situación problemática teniendo en cuenta que se encuentra casi al final del recorrido de los gases de escape.

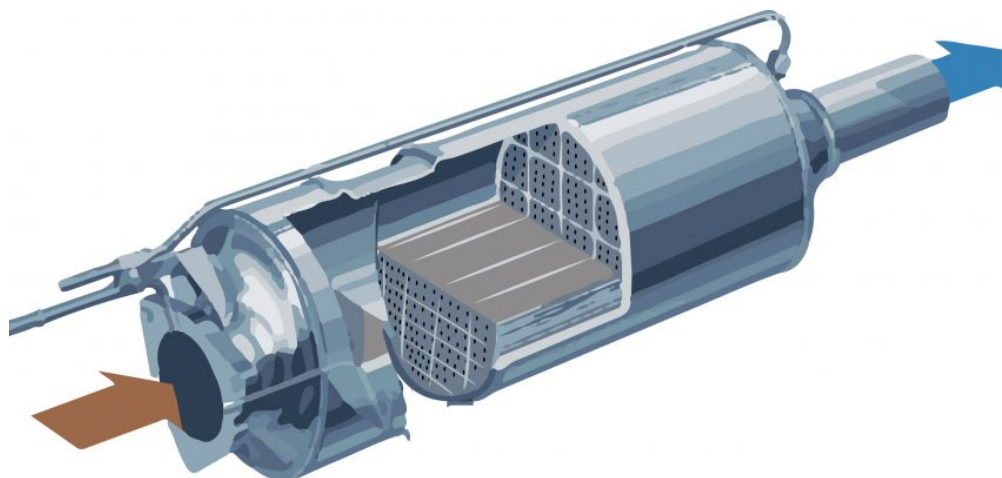


Figura 2: Esquema representativo de un DPF

- Hay más elementos en los vehículos diésel, como el LNT (Lean NO_x Trap, que combina otros elementos), pero en los motores gasolina normalmente solo un sistema se utiliza, el TWC o catalizador de tres vías. Esto se debe a que las condiciones de dosado son distintas en un tipo de motor y en el otro. El catalizador de tres vías necesita de un dosado igual a 1 (o muy próximo), y esta condición se cumple en los motores gasolina. Así, el TWC consigue oxidar el *CO* y los *HC* a la vez que reduce el *NO*, permitiendo una menor acumulación de sistemas.

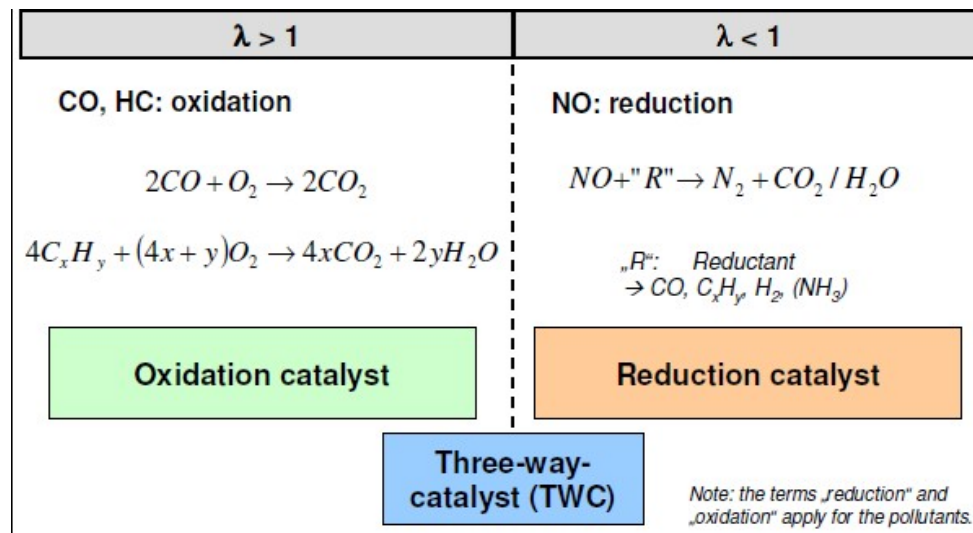


Figura 3: Reacciones en un TWC

Como se puede observar, numerosos sistemas cargan los montajes de motores MCIA. Esto está encareciendo cada vez más los motores, siendo esta tendencia destacada en los motores diésel. Cuanto más se sigan endureciendo las leyes anticontaminación, más se encarecerán los motores MCIA. El paso siguiente debería ser buscar maneras de reemplazarlos.

2.3. El estado del híbrido

Los vehículos con un grupo motor híbrido (4) entre un MCIA y un motor eléctrico tienen su razón de ser más allá de la reducción de emisiones, a pesar de ser esta una importante ventaja. Cuando se utiliza un MCIA, cerca del 60% de la energía producida se "pierde" en forma de calor, aunque en realidad se acaba aprovechando parte de ella para otras funciones. Además, la energía producida en los motores térmicos de combustión interna es unidireccional. Esto quiere decir que una vez se genera y utiliza la energía proveniente de una determinada cantidad de combustible, esa energía no es recuperable.

Sin embargo, los motores eléctricos, si hay algo en lo que destacan, es en la eficiencia. Más del 90% de la energía que producen es aprovechable en su función principal, sin pérdidas en forma de calor o similares. Además, se dice que los motores eléctricos son bidireccionales: puede convertir la energía eléctrica que genera en el movimiento del vehículo y puede recuperar energía de la energía cinética acumulada en el vehículo durante frenados y similares gracias a la energía que está dando en ese momento cualquier otro motor. Es decir, en el caso de un vehículo híbrido, el motor eléctrico puede recargarse (figura 5) cuando el vehículo esté funcionando con el motor de combustión interna.

El ahorro energético que proporcionan los vehículos híbridos está basado en esta propie-

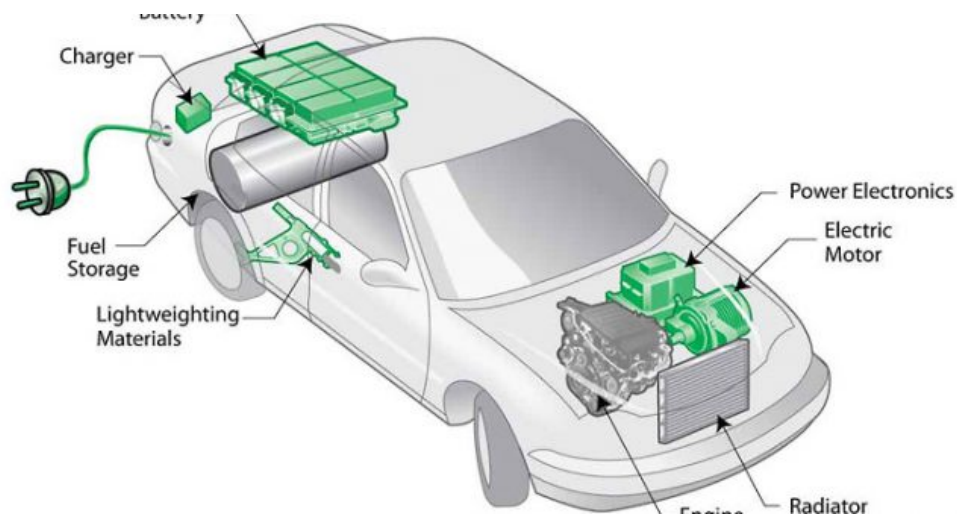


Figura 4: Ejemplo de coche híbrido

dad y en evitar que sea el motor térmico el que funcione en las situaciones de mayor gasto, como las zonas de ciudad donde el vehículo para, acelera un poco, frena... Si estas situaciones se sobrepasan con la energía dada por el motor eléctrico, que puede ser energía generada durante la conducción,

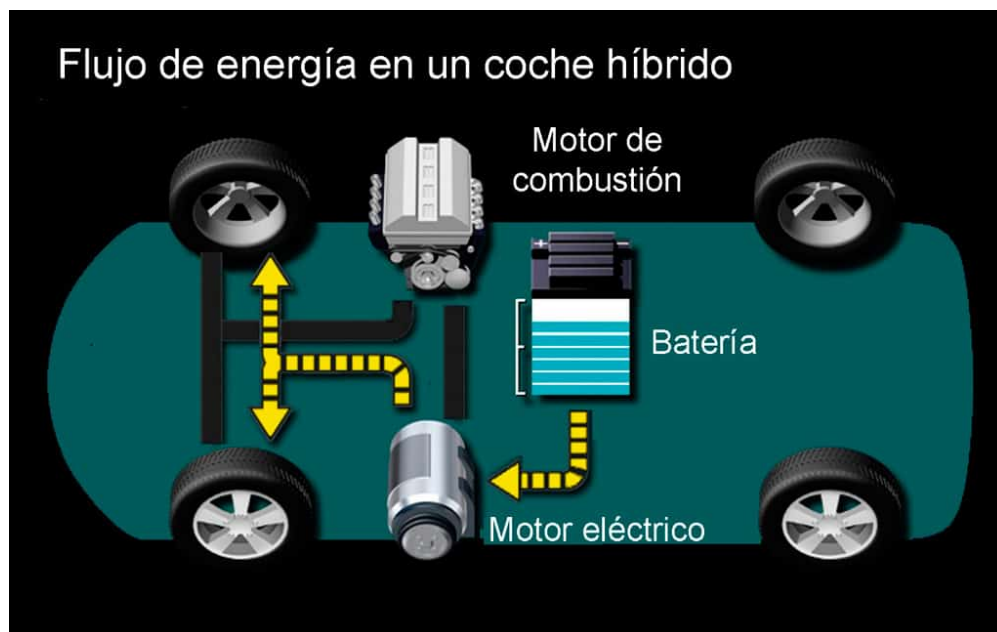


Figura 5: Funcionamiento de un coche híbrido con carga

Los vehículos híbridos están, actualmente, clasificados según tres criterios distintos: según el flujo de energía, según la autonomía del motor eléctrico y según si son o no enchufables.

El primer tipo de clasificación incluye tres tipos de vehículos, e indica cómo están conectados los motores del mismo: conexión en serie, conexión en paralelo y conexión híbrida serie-paralelo.

- La conexión en serie indica que el vehículo dispone de un motor principal eléctrico encargado de mover el coche, al cual está conectado en serie un motor secundario auxiliar (el térmico) que generalmente tiene como función recargar baterías y otras tareas similares. Por ejemplo, en un coche con propulsión principalmente eléctrica, el motor secundario funciona esencialmente como un cargador de batería o como un apoyo para ciertas situaciones de conducción. Este motor secundario es lo que se conoce como **Range Extender**, y es posible porque no depende del régimen de giro del vehículo y siempre puede funcionar en su zona de máxima eficiencia.
- Por otra parte, la conexión en paralelo indica que dos motores (térmico e híbrido) tienen la función de propulsores y están conectados ambos a las ruedas. La mayor parte de los híbridos caen en esta categoría. La desventaja de este tipo de vehículo es que el motor térmico está ligado a la velocidad del vehículo y tiene que trabajar fuera de la zona de máxima eficiencia durante gran parte del funcionamiento. A cambio, ofrece una hibridación más sencilla y fácil de llevar a cabo.
- Para la conexión híbrida serie-paralelo, el vehículo cuenta con dos propulsores (térmico e híbrido) conectados a las ruedas, de manera que el motor térmico puede funcionar tanto en paralelo cargando las baterías como en serie propulsando el vehículo.

El segundo tipo de clasificación hace referencia a la capacidad del vehículo de desplazarse utilizando únicamente energía eléctrica. En esta clasificación entrarían:

- En primer lugar, aquellos motores eléctricos entre cuyas funciones no se incluye la propulsión del vehículo, sino que simplemente se encargan de cargar la batería durante las fases de frenado.
- En segundo lugar, los motores que ofrecen un apoyo para las conducciones en ciudad, permitiendo realizar arranques y ligeras aceleraciones mediante el motor eléctrico, a pesar de ser el motor térmico el que se encarga en su amplia mayoría de la propulsión del vehículo.
- Por último, los vehículos *full hybrid*, que son aquellos cuyos motores eléctricos permiten circular a velocidades de conducción reales (60-130 km/h) durante autonomías mayores, sin ser estas a día de hoy suficientes para equipararse a vehículos de propulsión térmica (5-50 km, 100 km incluso).

La última de estas clasificaciones habla por sí misma, simplemente clasifica el vehículo en función de si tienen o no un enchufe que permita cargar la batería del motor eléctrico. Esa decisión se toma según el tamaño de la batería: si es demasiado pequeña simplemente se carga durante las fases de frenado o de conducción con motor térmico, y es cuando la batería tiene un tamaño que ofrece una autonomía aceptable cuando merece la pena incluir un cargador y enchufe.

3. *3S ICE - El motor de 3 tiempos*

El motor que origina el proyecto presentado en este documento es el novedoso *3 Strokes Internal Combustion Engine* (figura 6) realizado por la empresa InnEngine, un motor basado en un ciclo de 3 tiempos. Tras haber llegado a un acuerdo con el Centro de Motores Térmicos - CMT, se inicia el estudio y más tarde los ensayos con un prototipo del motor, que permiten conocer y obtener unos primeros datos sobre el mismo. La empresa trae consigo una serie de documentos que facilitan la tarea de describir el prototipo, dando a conocer a los trabajadores su funcionamiento.

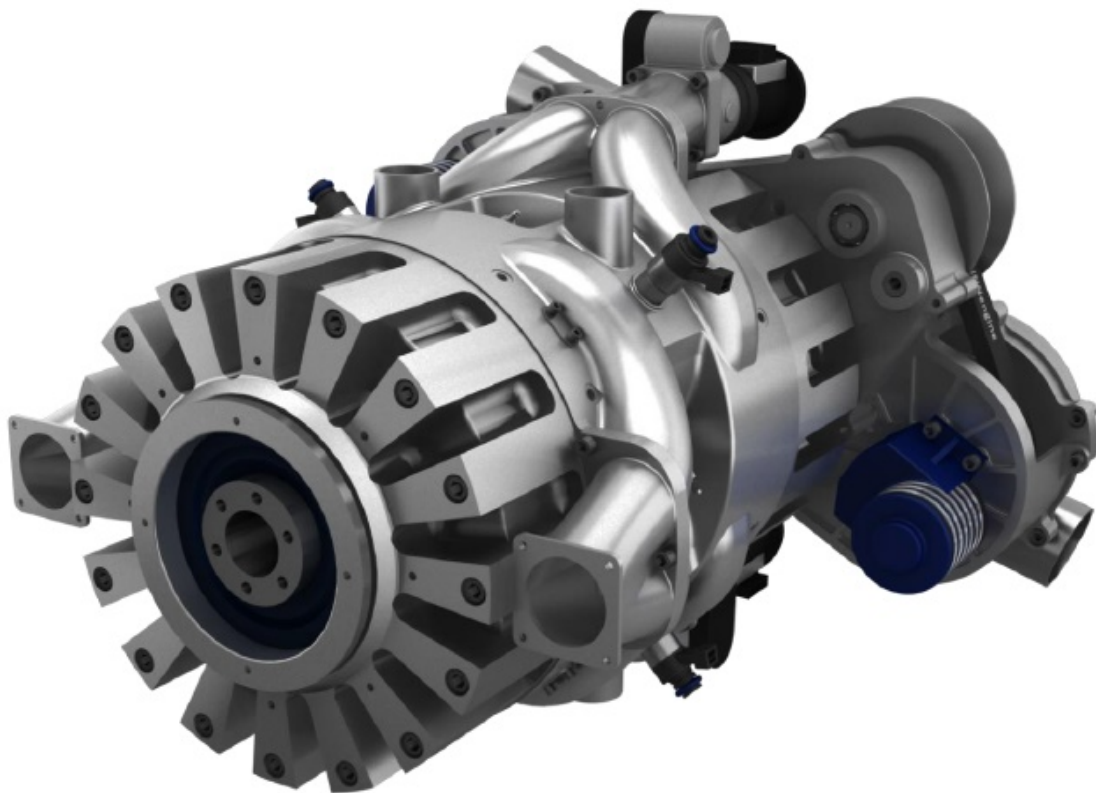


Figura 6: Diseño por ordenador del motor 3S ICE de InnEngine

Tras haber visitado el estado de la técnica en el apartado anterior, se realiza una descripción del motor y de las novedades que presenta, enfrentadas a las características pertinentes en los motores utilizados actualmente.

3.1. *¿En qué consiste?*

El motor 3S ICE (7, 8) está constituido por un cárter cilíndrico con dos tapas atravesado por un eje hueco, el cual presenta un orificio por cada cilindro que atraviesa la pared del

eje. Estos agujeros conectan con los brazos conectados a los 4 cilindros, dentro de los cuales están situados, en cada uno, dos cilindros enfrentados con un soporte para un cojinete lineal y una cámara.

En las tapas del cárter se encuentran sendas coronas con una ondulación cada una de ellas. Un soporte para rodamientos se halla en el extremo exterior de cada uno de los émbolos, mientras que un muelle de compresión mantiene los émbolos en la posición adecuada. Una llanta de acero provista de retenes se encuentra sujeta solidariamente al brazo.

El colector de salida del aire caliente está formado por unas aletas sujetas a la llanta que pasan por el interior de una pieza tubular. El aire entra a través de las lumbreras y sale a través de colectores.

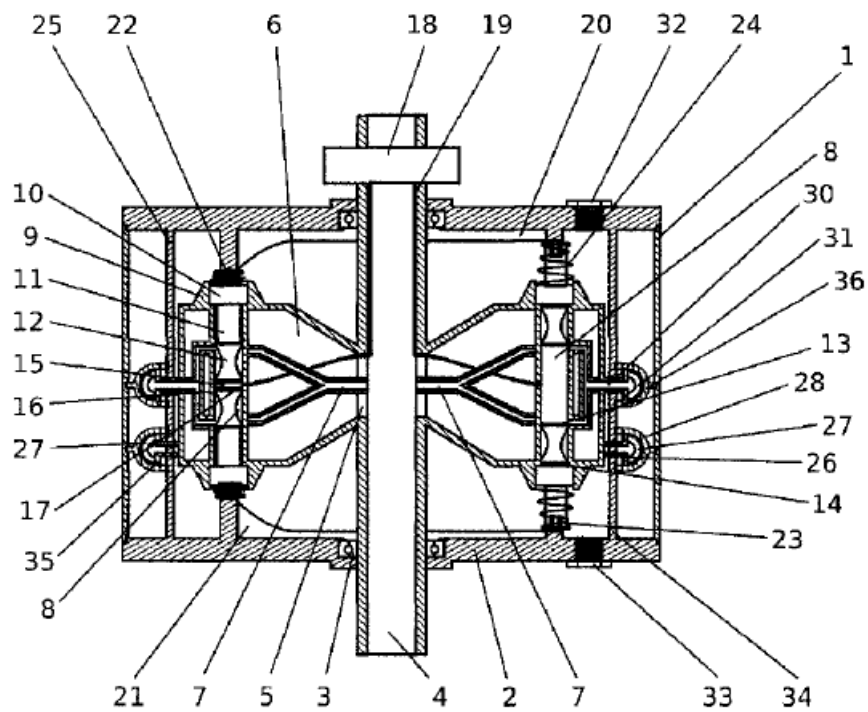


Figura 7: Alzado - Dibujos del 3S ICE

Los elementos que aparecen señalizados en las distintas imágenes aparecen listados en el cuadro 1.

Esta descripción mecánica corresponde al motor de combustión interna de tres tiempos que presenta un novedoso sistema de pistones enfrentados que accionan un movimiento rotativo en el eje motriz, consiguiendo menor vibración y gasto que los motores térmicos convencionales.

Lista de elementos

| | |
|----|---------------------------------------|
| 1 | Cárter cilíndrico |
| 2 | Tapas del cárter |
| 3 | Cojinetes |
| 4 | Eje hueco |
| 5 | Orificios en el eje hueco |
| 6 | Brazos |
| 7 | Lumbreras de admisión |
| 8 | Cilindros |
| 9 | Soporte para cojinete lineal |
| 10 | Cojinete lineal |
| 11 | Cuerpo del émbolo |
| 12 | Cabeza del émbolo |
| 13 | Segmento de compresión |
| 14 | Segmento de engrase |
| 15 | Cámara de compresión |
| 16 | Calentador |
| 17 | Inyector |
| 18 | Bomba de inyección ¹ |
| 19 | Conductos del combustible |
| 20 | Coronas |
| 21 | Ondulaciones |
| 22 | Picos de altura de las ondulaciones |
| 23 | Soporte para el sistema de rodamiento |
| 24 | Muelle |
| 25 | Llanta |
| 26 | Colector de refrigeración |
| 27 | Aletas |
| 28 | Pieza tubular del aire caliente |
| 29 | Salida al exterior del aire caliente |
| 30 | Lumbrera de escape |
| 31 | Colector de escape de gases |
| 32 | Tapón de entrada de aceite |
| 33 | Tapón de salida de aceite |
| 34 | Retenes en la llanta |
| 35 | Retenes de contención |
| 36 | Pieza tubular de gases de escape |
| 37 | Salida al exterior de gases de escape |

Cuadro 1: Elementos del motor

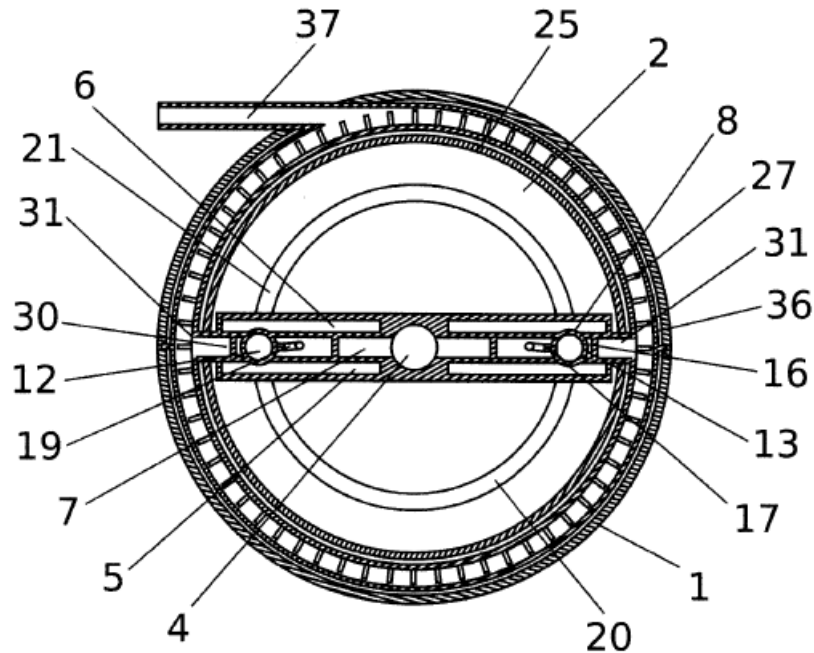


Figura 8: Planta - Dibujos del 3S ICE

La aplicación seleccionada para el 3S ICE es la industria de la automoción y, dentro de ella, la aplicación objetivo es la de motor térmico rotativo auxiliar. En este sector priman las tecnologías compactas, con bajos costes y que den resultados técnicamente apreciables, de manera que el motor térmico deje espacio no solo al eléctrico, sino a todos los componentes adicionales necesarios, y que la combinación de los dos motores no suponga gastos desorbitados. Son precisamente estas características las que se han perseguido durante el desarrollo del motor presentado.

La empresa asegura que el 3S ICE presenta hasta un 75 % en la reducción del peso, hasta un 70 % en la reducción del volumen y una reducción similar en la cantidad de componentes, ya que el motor prescinde de culatas de cilindro, válvulas de admisión/escape junto a sus sistemas y cigüeñal. De esta manera tratan de cubrir los puntos respectivos al espacio, peso y sencillez.

Para cubrir el rendimiento del motor y mantener unas prestaciones competentes, se utilizan diversas medidas entre las que se incluyen las novedades presentadas por el fabricante. La tecnología del motor de 3 tiempos permite una densidad de energía mucho mayor al producir cuatro combustiones más por cilindro y revolución que un motor de 4 tiempos, de manera que un motor de 3 tiempos de 700cc equivaldría en potencia a uno de 2800cc de 4 tiempos. Esto se consigue porque el motor de 4 tiempos lleva a cabo medio ciclo por revolución mientras que el motor de 3 tiempos consigue dos ciclos por revolución. Esto además

permite obtener buenas prestaciones en bajas revoluciones por minuto. Para conseguir este objetivo son esenciales las novedades presentadas: los sistemas dinámicos VPT (*Variable Ports-Timing*) y VCR (*Variable Compression Ratio*), cuyas características se describen tras el funcionamiento del motor.

3.2. Funcionamiento

Como el nombre indica, el motor 3S ICE se reivindica como un motor de combustión interna de tres tiempos: un primer tiempo de compresión, un segundo tiempo de combustión y expansión y un tercer tiempo de barrido y refrigeración. Esto supone un proceso que aúna ventajas de los motores de 4 tiempos y de 2 tiempos, pero también tiene algunas de las desventajas de ambos.

Dentro del cilindro, dos émbolos opuestos con movimiento axial con respecto al cilindro forman en la mitad del mismo la cámara de compresión debido a ese movimiento opuesto de los émbolos. Estos están formados por una primera parte cilíndrica y una segunda en forma de diábolo, que funciona como la cabeza del émbolo, y tienen al menos un segmento de compresión y uno de engrase al principio de la cabeza. En cada uno de los extremos del cilindro se sitúa un soporte para un cojinete lineal.

Dentro de la cámara, hay un calentador y, en caso de situar inyección directa, un inyector de combustible accionado por una bomba de inyección que se encuentra en el exterior de una de las tapas cárter, con un conducto que se dirige a cada uno de los cilindros o un solo conducto que se ramifica en tantos conductos como inyectores tenga el motor.

Si en cambio se utilizan carburadores, estos inyectores desaparecen y se incluyen los carburadores en el camino a las lumbreras de admisión, generando la mezcla fresca antes de los cilindros.

Cada cilindro funciona de manera independiente, pudiendo utilizarse el motor con tan solo un cilindro en funcionamiento, lo cual permite conectar/desconectar cilindros según interese para la aplicación final.

El funcionamiento del motor se inicia con un motor de arranque que inicia el giro del eje motriz. Los mecanismos de rodamientos de los émbolos se desplazan por las coronas hasta llegar al principio de las rampas de las ondulaciones, empezando en este momento el tiempo de compresión del aire que ha entrado por las lumbreras de admisión. En este momento comienza a circular aire fresco por los laterales del émbolo y los extremos del cilindro, permitiendo la refrigeración de estos y barriendo por el colector de escape cualquier partícula procedente de la cámara de combustión que superase los segmentos de combustión. Cuando

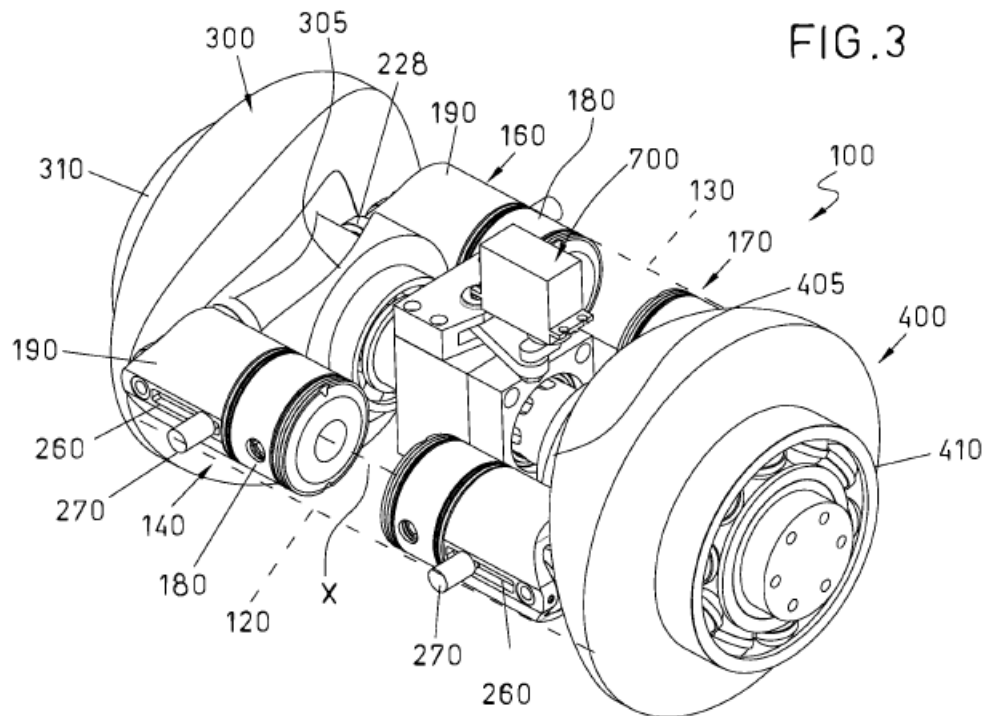


Figura 9: Planos del motor

los émbolos llegan a los picos de las ondulaciones, el aire se encuentra en su máxima compresión adquiriendo la temperatura y presión suficiente para hacer explotar el combustible en la mezcla/inyectado (o, en realizaciones distintas del motor, se utilizan bujías), siendo este el instante en el que se inicia el tiempo de combustión y expansión. Dicho tiempo concluye cuando los émbolos alcanzan los finales de las rampas de ondulación, empezando en este instante el tercer tiempo de barrido y refrigeración. Aquí concluye la refrigeración de los extremos del cilindro y de la cabeza del émbolo. Durante este tiempo los émbolos se encuentran en su posición de máxima abertura, permitiendo así circular el aire a través del cilindro. De esta manera se expulsa el aire de la combustión, se refrigera y se renueva el aire para el siguiente ciclo que empieza cuando los émbolos llegan al principio de las rampas de subida de las ondulaciones de las coronas consiguiendo así transformar el movimiento lineal de los émbolos en movimiento giratorio del eje motriz.

Entre las distintas alternativas propuestas para el motor, se previeron algunas en las que se incluyen sistemas de lubricación cerrados de presión, sistemas de sobrealimentación, practicar ranuras en las cabezas de los émbolos (para aumentar el flujo del aire, reducir la masa del émbolo y mejorar la refrigeración), 3 posiciones distintas de las lumbreras (a misma altura, escape adelantada a admisión y viceversa), disposiciones direccionales diferentes de las lumbreras, etc.

El funcionamiento descrito no explica ni el actuador (sistemas VPT y VCR) ni cómo se ha llevado la conexión de los colectores de admisión/escape, una curiosidad del motor. Estos detalles se explican a continuación.

3.2.1. Los cilindros del motor

Si se observa la figura 11 con atención (los conductos rojos emulan el flujo caliente del escape, mientras que los azules son de admisión), se puede comprobar que los conductos de admisión y de escape unen las entradas y salidas de los cilindros de dos en dos. No obstante, esta unión no es la misma para la admisión y para el escape. Si se numeran los cilindros de 1 a 4 (10) la admisión une los cilindros 1-4 y 2-3, mientras que la salida une los cilindros 1-2 y 3-4.

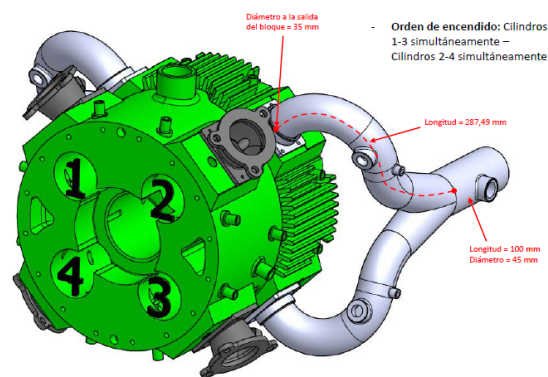


Figura 10: Numeración y orden de acción de los cilindros

La finalidad de estas conexiones es reducir las vibraciones del motor y evitar posibles funcionamientos erróneos debidos al orden de encendido de los cilindros. Los cilindros 1 y 2, siguiendo la numeración elegida, queman a la vez, mientras que los cilindros 3 y 4 lo hacen con un desfase de 90° respecto a los dos primeros. La manera de conectarlos reduce las vibraciones, incluso aunque a la salida se conectaran igual que a la entrada. Lo importante es que la admisión de los cilindros 1-2 y 3-4 no vengan dadas por el mismo colector para asegurar que las presiones de admisión generen los flujos en las direcciones correctas.

3.2.2. Los efectos VPT y VCR - Actuador

También en la figura 11 se puede observar aquello nombrado en diversas ocasiones como **actuador**: son los discos metálicos con agujeros situados en los apoyos de los émbolos. Este sistema es el responsable del *Variable Ports Timing* y del *Variable Compression Ratio*.

Este actuador no es más que una pareja de discos con excentricidades de distinto tamaño que permite que los discos hagan las funciones de leva. El disco está diseñado para que se seleccione una posición y los cilindros varíen su comportamiento en función de la misma. Las posiciones que se mencionan son las elecciones posibles en el actuador, que corresponden a desfases entre los discos situados en los émbolos de admisión y escape.

- El actuador cuenta con diversas posiciones, que debido al mecanismo en que se seleccionan vienen nombradas según el desplazamiento del mismo, siendo estas 0 mm, 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 12 mm y 16 mm, o simplemente el valor sin la unidad de medida. En este documento se verán referencias a ambas nomenclaturas, especialmente a la segunda.
- Los dos discos giran solidariamente, sin embargo el actuador realiza un desfase de menor a mayor valor en la posición de los discos. Es decir, si se escoge una posición distinta de la de 0 mm, el disco de escape iniciará su recorrido en un valor inicial de la posición de los cilindros distinta a la del disco de admisión. A mayor posición, mayor será el desfase entre apertura y cierre de admisión y escape (se desplaza el escape, como se puede ver en las figuras 12 y 13). Este desfase genera un mayor volumen mínimo y un menor volumen máximo de la cámara en el momento de la combustión (figuras 14, 15 y 16), pues el émbolo de escape subirá y bajará en tiempos distintos al de admisión, haciendo que el PMS de cada uno se alcance en momentos distintos. La combinación de ambos efectos genera la disminución de la relación de compresión. Este sistema, formado por el actuador, los discos y los elementos mecánicos que los conectan, son los responsables del VCR y el VPT.

Las diferencias en volumen y en apertura/cierre de válvulas se pueden comprobar con los perfiles obtenidos con los ensayos del prototipo que facilitó el fabricante al CMT. Se adjuntan imágenes de los valores de volumen de cámara y de apertura/cierre de válvulas dados por las posiciones estándar (0 mm) y la de máxima excentricidad (16 mm). Esa diferencia en volumen genera una diferencia en el ratio de compresión, como se puede observar en la figura 17.

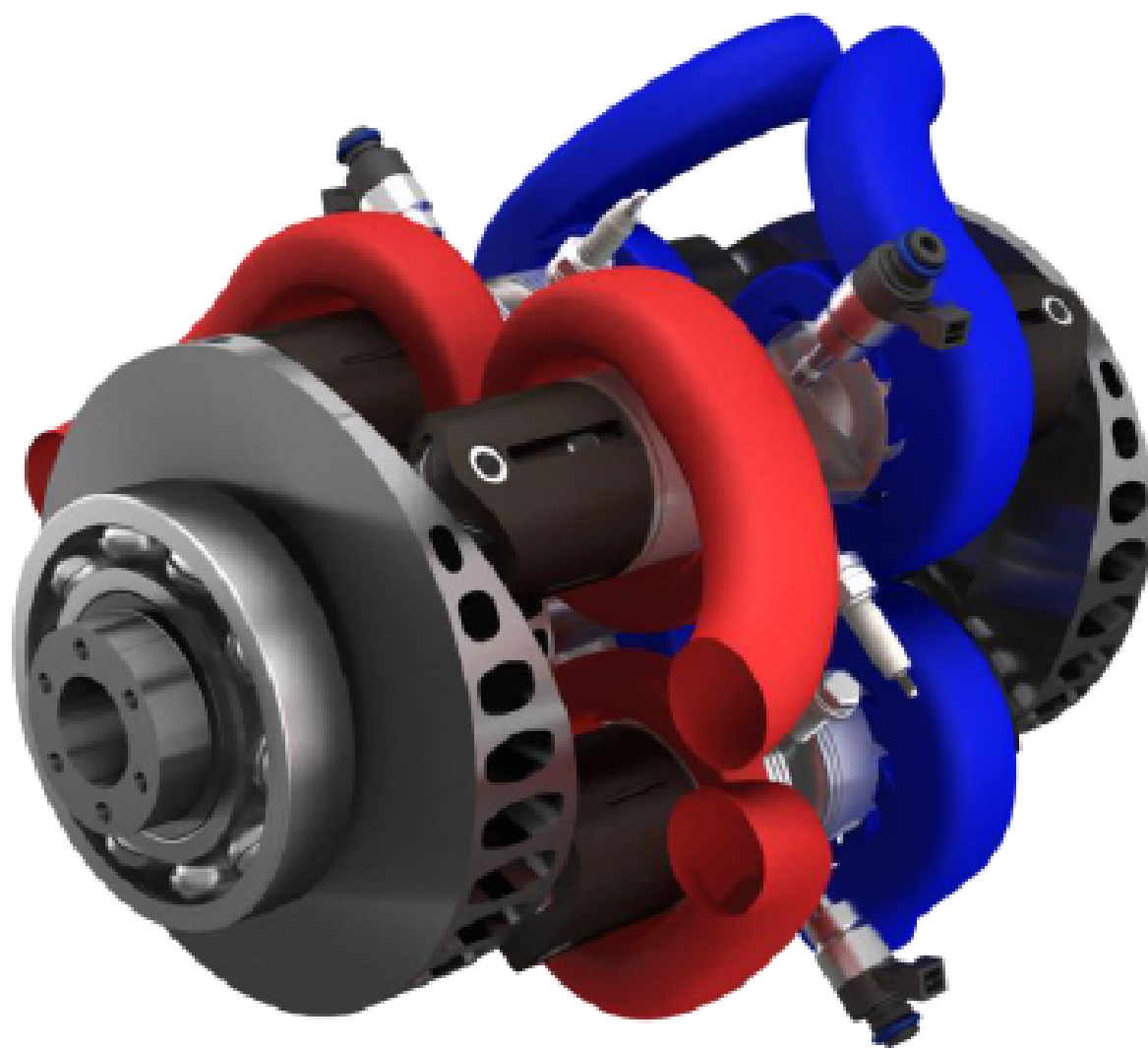


Figura 11: Representación del motor que permite observar ambos discos-leva

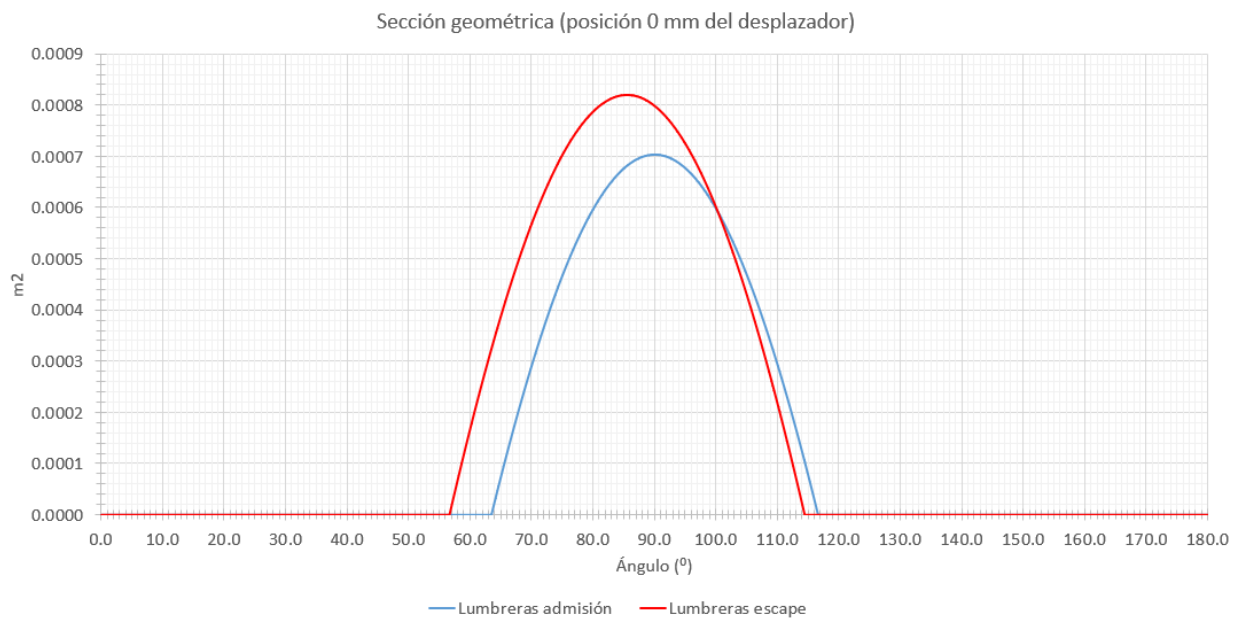


Figura 12: Aperturas de lumbreras en la posición 0 mm

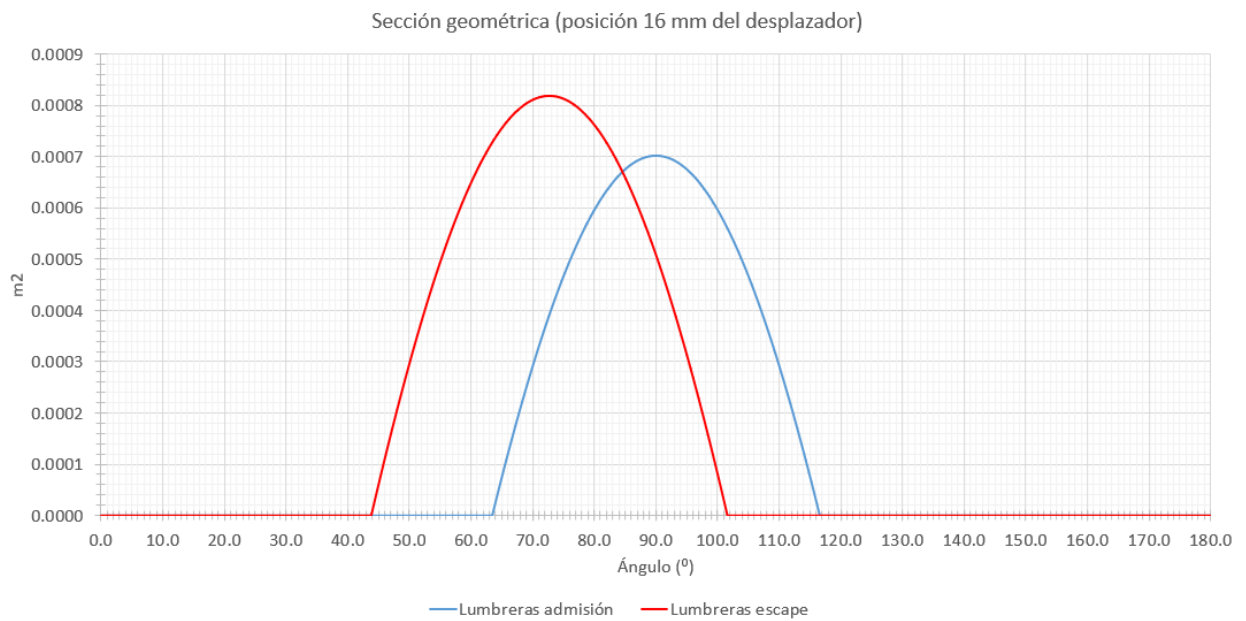


Figura 13: Aperturas de lumbreras en la posición 16 mm

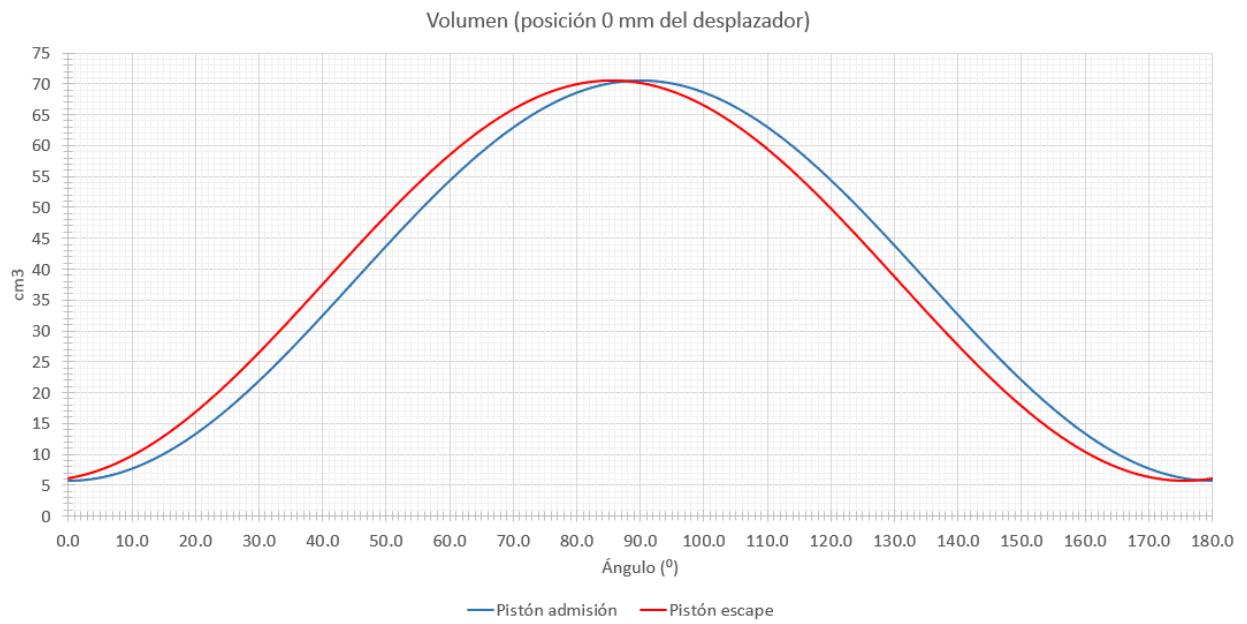


Figura 14: Volumen de la cámara en la posición 0 mm

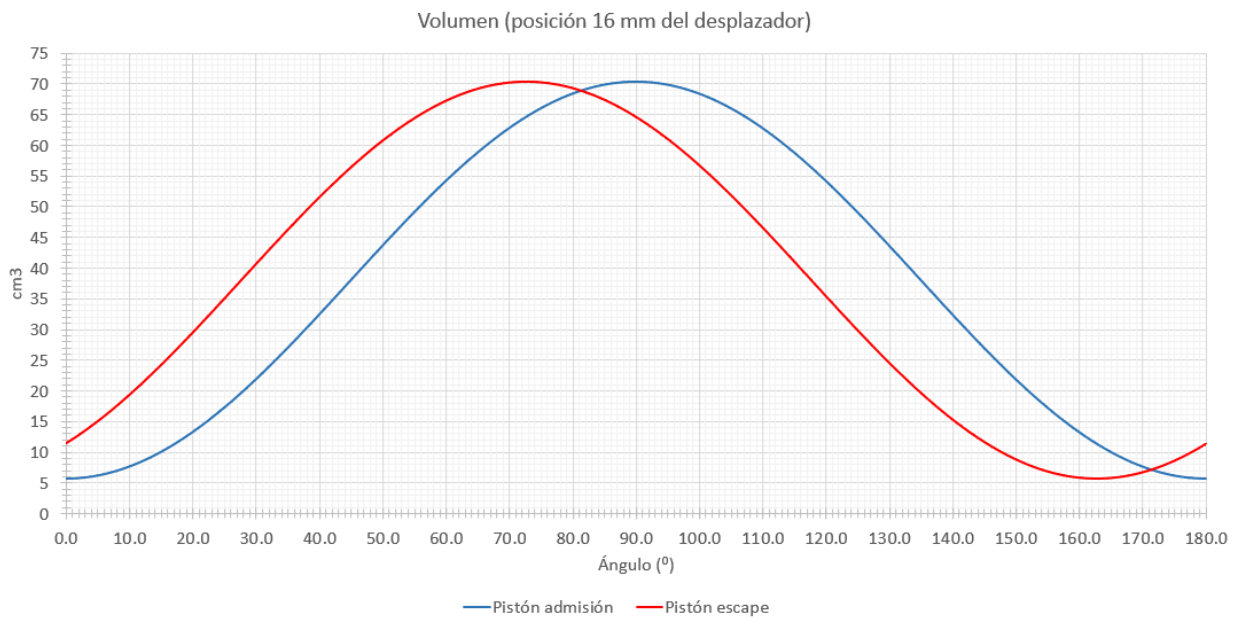


Figura 15: Volumen de la cámara en la posición 16 mm

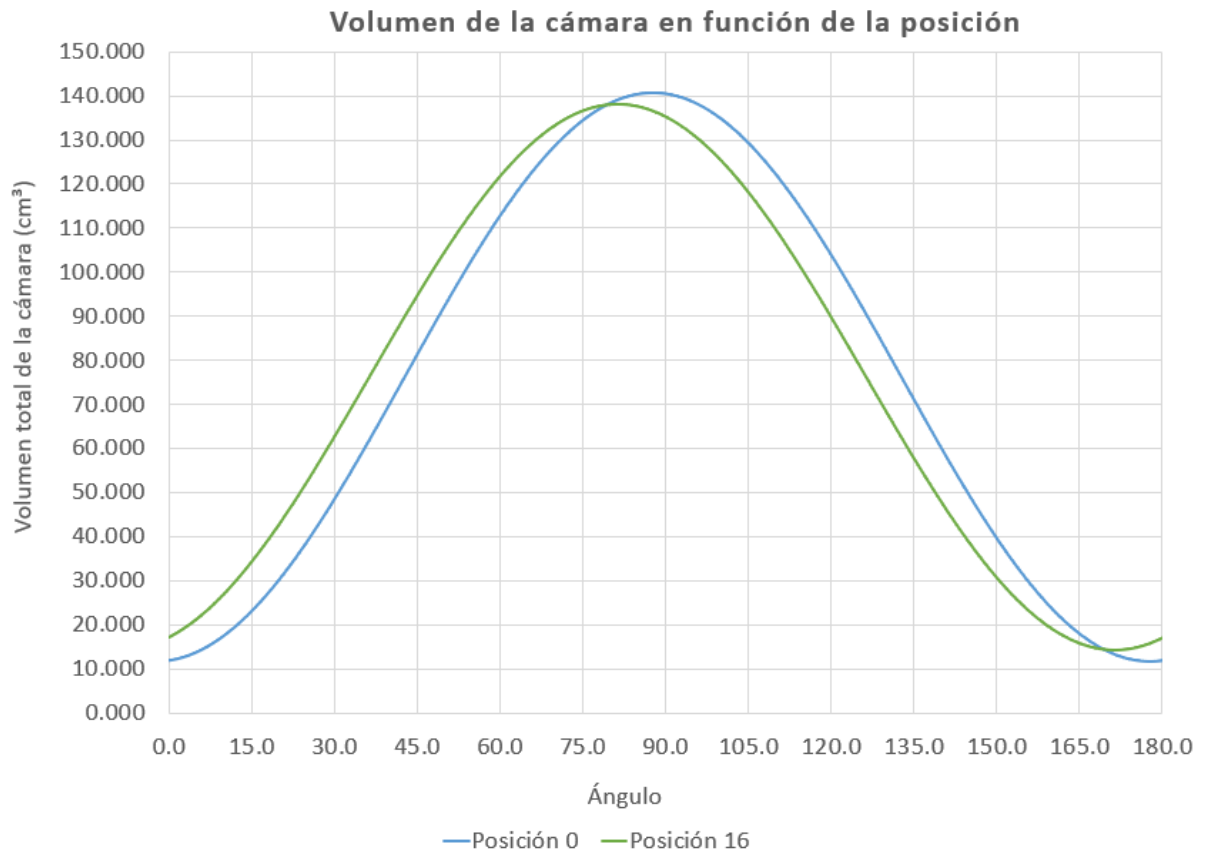


Figura 16: Volumen en función de la posición

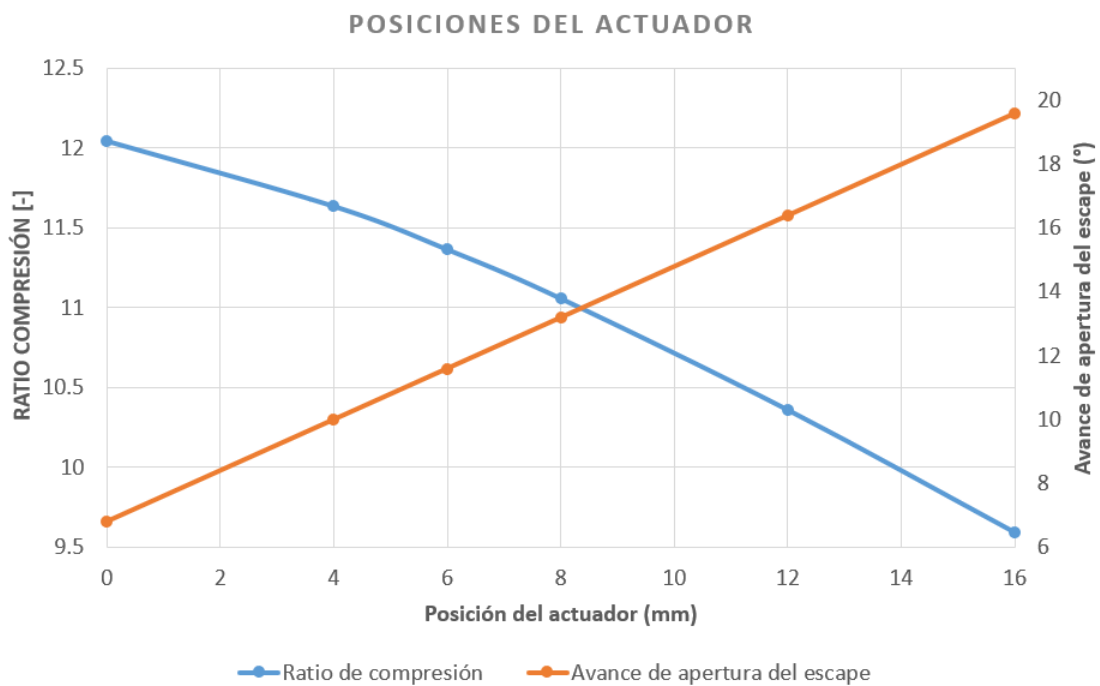


Figura 17: Variación del ratio de compresión con la posición

4. VEMOD - Virtual Engine Model

Con motivo de reducir los costes a la hora de obtener resultados para el estudio del motor y el subsecuente desarrollo del mismo, se decide utilizar una herramienta de modelado por ordenador que permita obtener resultados que sustituyan los obtenibles por ensayo. Para ello, se ha de tener una herramienta que de los resultados de manera eficaz y económica, es decir, que no supongan un trabajo excesivo y que permita abaratar los costes.

Estas herramientas de modelado tienen un enorme trabajo de programación detrás, acompañado de extensos conocimientos de la materia en que se especializa. La finalidad de su uso es que supongan un coste de tiempo y dinero inferior al que supondría generar modelos físicos del motor en sus distintas fases de desarrollo y realizar los ensayos experimentales pertinentes para comprobar el funcionamiento del mismo. Es por ello que, a pesar del trabajo mencionado, en general resulta una buena idea acudir a estas herramientas.

Para que sean funcionales y permitan sustituir a los ensayos, han de demostrar que los resultados que ofrecen son comparables a datos previos de algún tipo. Es lo que se conoce como validación del modelo/herramienta, y es fundamental para un correcto desarrollo de un proyecto. En el proyecto que presenta este documento se utiliza la herramienta VEMOD, y por ello se explican a continuación algunas de sus características.

4.1. Introducción a VEMOD

VEMOD es una herramienta de integral e independiente desarrollado por el Centro de Motores Térmicos de la Universitat Politècnica de València [6]. Aparece con el objetivo de tener una herramienta de modelado virtual (virtual engine model - V E MOD) que permita realizar modelos de diferentes motores para predecir las emisiones que producen en condiciones variables de manera sencilla mediante una interfaz gráfica con elementos. Surge como respuesta ante las nuevas normativas respecto a las emisiones de CO_2 y NO_x , y combina modelos de conducción, de vehículo y de motor como se puede ver en la Figura 18.

Se empieza a trabajar en la herramienta VEMOD, además de para generar una herramienta que cubra las nuevas necesidades mencionadas con anterioridad, para conseguir una herramienta cuya interfaz permita una buena accesibilidad a sus funciones. Esto significa, entre otras cosas, que su funcionamiento sea intuitivo y la interfaz amigable, para que sea atractiva a los posibles usuarios, que sea flexible, para que aumente el público objetivo, y que disponga de distintas configuraciones (turbogrupos, inyectores, opciones de pos-tratamiento, desconexión de cilindros, etc.) para que sea una herramienta fundamental y competitiva.

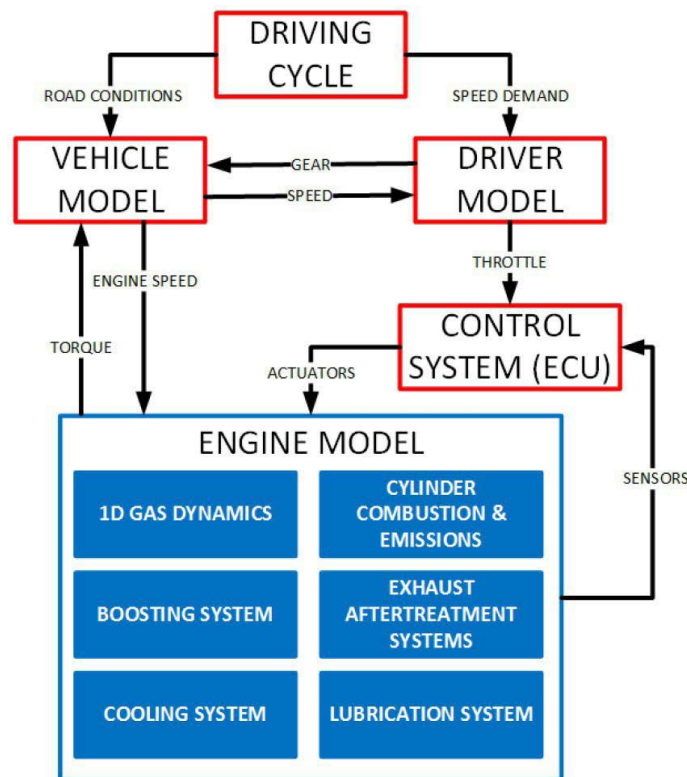


Figura 18: Módulos utilizados en VEMOD.

Entre las ventajas de conseguir una herramienta así se sitúa el hecho de que el desarrollador entiende la herramienta y es capaz de trabajar con ella, o al menos de tener claro el objetivo de un cálculo/modelo. La formación de nuevos usuarios será mucho más sencilla si pueden utilizar una herramienta que te guía sin necesidad de extensos tutoriales, y siempre será preferible a la alternativa de programar extensos programas en lenguaje de programación a mano.

Referido a lo técnico, la herramienta está basada en un modelo *wave-action* 1D que calcula las propiedades fluidotermodinámicas del gas en cada parte del motor, ofreciendo resultados en cada sección de interés. El motor está modelado mediante conductos unidimensionales (1D), mientras que los cilindros, depósitos y otros volúmenes del motor se modelan como elementos 0D.

4.2. Modelos utilizados en VEMOD

A lo largo del documento se han mencionado y se van a seguir mencionando diversos modelos que se utilizan en la herramienta VEMOD, y algunos de ellos se utilizan concretamente para este proyecto. Por ello este punto se dedica para explicar de dónde vienen algunos de los diversos modelos disponibles en la herramienta (los utilizados en el proyecto) y cómo

funcionan.

4.2.1. Dinámica del gas - Modelo 1D

Como se ha explicado, el modelo del motor se basa en elementos volumétricos 0D y conductos 1D. Para estos elementos unodimensionales, el modelo utiliza el método FVM de Godunov [7] y el *HLCC Riemann solver* [8]. La técnica numérica resultante es tan conservativa que permite el uso de grandes mallas para reducir el tiempo de cálculo sin perder eficiencia de cálculo en los volúmenes gracias a que todos los efectos, incluido las interacciones de ondas, el transporte de especies, la transferencia de calor o la fricción entre gas y pared.

En los tubos se resuelven las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía en cada una de las celdas de la malla, para cada paso temporal. El sistema de conservación viene dado por la siguiente ecuación vectorial.

$$\frac{\delta W_i}{\delta t} \cdot v_i + (-F(W)_{i-\frac{1}{2}} \cdot A_{i-\frac{1}{2}} + F(W)_{i+\frac{1}{2}} \cdot A_{i+\frac{1}{2}}) + V_i \cdot (-A_{i-\frac{1}{2}} + A_{i+\frac{1}{2}}) + C_i \cdot v_i = 0 \quad (1)$$

donde

$$W = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho \cdot u \\ \rho \cdot h_t \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} \rho \cdot u \\ \rho \cdot u^2 \\ \rho \cdot u \cdot h_t \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} 0 \\ -p \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho \cdot G \\ -\rho \cdot q \end{bmatrix} \quad G = \frac{1}{2} \cdot u \cdot |u| \cdot f \cdot \frac{4}{D} \quad (2)$$

En estas ecuaciones, G representa la fricción del fluido y q es el ratio de transferencia de calor por unidad de masa. El paso temporal para el cálculo se ve limitado por el tamaño de malla para permitir una buena estabilidad. Como algunos de los conductos son pequeños, podría haber reducciones en la velocidad de cálculo, por ello se utiliza la condición CFL que viene dada por la siguiente expresión:

$$\frac{t}{x} \cdot |u - a| < C \quad (3)$$

Siendo t el paso temporal, x el tamaño de malla, u la velocidad del gas, a es la velocidad del sonido en el interior del tubo y C es el número de Courant (se necesita un valor menor a 1.0. En VEMOD se utiliza 0.8).

En los elementos 0D se consideran las propiedades termodinámicas como homogéneas, debido a que no existe una dirección clara del flujo. Esto permite omitir la ecuación de conservación de cantidad de movimiento.

Al final, la combinación de los recursos resultan en un interesante incremento de la velocidad de cálculo, cerca de 10 veces el tiempo real.

4.2.2. Condiciones de contorno

Se pueden realizar diferentes conexiones entre elementos según las diferentes condiciones de contorno necesarias para la correcta simulación del comportamiento del flujo entre celdas. Algunos elementos se utilizan de manera auxiliar para facilitar los cálculos, por ejemplo:

- Para representar válvulas se utilizan nodos que son, básicamente, coeficientes de descarga para la entrada/salida de elementos. También se sitúan valores de recuperación de energía cinética, en función de la condición deseada.
- Para conectar elementos 1D-1D, las celdas contiguas (la última del primer elemento y la primera del segundo) configuran una especie de conducto virtual. Esto permite conectar conductos de diferente diámetro o con algunas propiedades distintas.
- La conexión de elementos 1D-0D se da de manera similar. Un conducto virtual aparece entre las celdas contiguas, con las propiedades de la última celda del conducto y con la presión, temperatura y composición de la celda del elemento 0D.
- Si se desea realizar intersecciones de elementos 1D, se conecta cada conducto a un elemento 0D Figura 19 que permite realizar un cálculo del flujo que de cada elemento de manera más sencilla, por el tipo de conexión, permitiendo además que el flujo siga la dirección esperada.

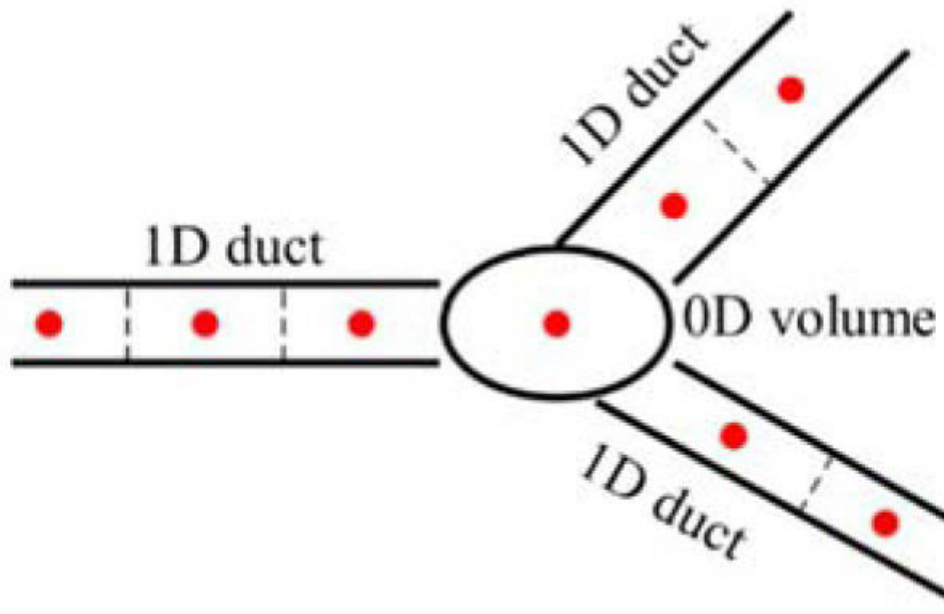


Figura 19: Conexión de múltiples elementos 1D.

4.2.3. Modelo de combustión

Habitualmente VEMOD utiliza un modelo de combustión cuya explicación completa se puede encontrar en [9] y [10], pero para el modelo del 3S ICE se ha impuesto una combustión de Wiebe. La ley de Wiebe predice la fracción másica de combustible quemada mediante una función de posición usando la función de Wiebe (Ecuación 4).

$$x_b = \beta \left(1 - \exp \left[-a \left(\frac{\theta - \theta_o}{\theta} \right)^{m+1} \right] \right) \quad (4)$$

donde β es un factor de corrección de amplitud, θ_o es el punto de inicio de la combustión (SOC o *Start Of Combustion*), θ es la duración de la combustión (TOC o *Time Of Combustion*), y m es el factor de forma. Por otra parte, el factor a no es completamente independiente, sino que está directamente relacionado con la duración de la combustión. En este caso, ajustada la duración del caso base se decidió el valor del factor a y se mantuvo para el resto de casos. Más explicaciones acerca de la ley de Wiebe se pueden encontrar en [10]

Para situar este modelo en VEMOD, desde el bloque motor se ha introducido la ley de Wiebe entre las distintas configuraciones de combustión y se han asignado valores que ajustarían la combustión a un proceso lo más similar posible al proceso realizado por el

motor en condiciones reales. El CMT ha utilizado el banco de ensayos con el motor que cedió InnEngine para realizar distintos ensayos y obtener, entre otras, una aproximación de la ley de combustión. De esta manera, tras diferentes experimentos, se eligió un punto de funcionamiento a partir del cual tratarían de ajustar la combustión, llegando a los siguientes valores para el punto base de 2000 rpm en la posición 2 del actuador:

| β | SOC | TOC | a | m |
|---------|------------|--------------|-----|-----|
| 1 | -9° | 32.5° | 6.9 | 1.5 |

Cuadro 2: Parámetros base para el uso de la ley de Wiebe.

Eso soluciona el punto de funcionamiento base. Para realizar los estudios es necesario ajustar el resto de puntos. Se ha llegado a la conclusión de que la velocidad de giro del motor afecta a la duración de la combustión y al inicio de la combustión. Este último parámetro también varía con la posición del actuador, pues modifica los tiempos del proceso. De esta manera, la combustión para los diversos puntos de funcionamiento (hablando de velocidad de giro) se ajusta con la tabla del anexo A.2, manteniendo β , m y a constantes.

4.2.4. Submodelo de transmisión de calor en cilindro

De los distintos modelos de transmisión de calor que existen en VEMOD, el modelo de transmisión en cilindros es el que más repercusión tiene en el proyecto del 3S ICE. Este modelo trabaja con el calor de la cámara de combustión y de las válvulas del cilindro. Este calor es necesario para realizar el balance de energías en la cámara y el balance global del bloque motor, ya que representa el aporte de calor más importante al circuito hidráulico.

Para predecir la transmisión de calor, se usa un modelo que agrupa conducción y capacidad térmicas [11] - [12]. Este modelo permite enlazar el interior del cilindro y los procesos dados en sus puertos al circuito hidráulico mediante el cálculo de la transmisión de calor. Al dividir el pistón y el cilindro en diferentes partes es sencillo aplicar a cada una su propia masa, conductividad y capacidad térmica, habilitando sencillas ecuaciones de conducción entre las mismas o convectivas con el fluido.

El modelo se inicializa con información geométrica del motor y de las distintas partes del bloque pistón-cilindro, así como propiedades térmicas de los mismos y del fluido. Para el calor por convección se necesita un coeficiente de transmisión de calor, y para obtenerlo se utiliza [13, 14] una correlación de Woschni modificada

| RPM | TOC (rad) | SOC P0 | SOC P2 | SOC P4 | SOC P8 | SOC P12 | SOC P16 |
|------|-----------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 500 | 0.280 | -0.107 | -0.114 | -0.121 | -0.134 | -0.148 | -0.163 |
| 1000 | 0.396 | -0.152 | -0.162 | -0.172 | -0.190 | -0.210 | -0.231 |
| 1500 | 0.485 | -0.186 | -0.198 | -0.210 | -0.233 | -0.257 | -0.283 |
| 2000 | 0.560 | -0.215 | -0.229 | -0.243 | -0.269 | -0.297 | -0.326 |
| 2500 | 0.626 | -0.240 | -0.256 | -0.271 | -0.301 | -0.332 | -0.365 |
| 3000 | 0.686 | -0.263 | -0.280 | -0.297 | -0.329 | -0.363 | -0.400 |
| 3500 | 0.741 | -0.287 | -0.302 | -0.321 | -0.356 | -0.393 | -0.432 |
| 4000 | 0.792 | -0.304 | -0.323 | -0.343 | -0.380 | -0.420 | -0.462 |
| 4500 | 0.840 | -0.322 | -0.343 | -0.364 | -0.403 | -0.445 | -0.490 |
| 5000 | 0.885 | -0.339 | -0.362 | -0.384 | -0.425 | -0.469 | -0.516 |

Cuadro 3: Valores de TOC y SOC en radianes para todas las posiciones y velocidades de giro incluidas en el estudio

$$h_w = C_1 \cdot D^{-0,2} \cdot p^{0,8} \cdot T_g^{-0,53} \cdot \left(C_{W1} \cdot c_m + C_{W2} \cdot c_u + C_2 \frac{V \cdot T_{IVC}}{P_{IVC} \cdot V_{IVC}} (p - p_0) \right)^{0,8} \quad (5)$$

donde C_{W1}, C_{W2}, C_1 y C_2 se obtienen con datos experimentales de ensayos de motor [14], c_m es la velocidad media del pistón, c_u es la velocidad instantánea tangencial del gas en la cámara, p_0 es la presión de las condiciones de motor asumiendo una evolución politrópica, p y T_g son presión y temperatura en el interior del cilindro y p_{IVC}, T_{IVC} y V_{IVC} son presión, temperatura y volumen en el IVC.

4.2.5. Modelado del proceso de barrido

Para explicar los fenómenos que ocurren dentro del cilindro cuando llega el momento de la renovación de la carga (la mezcla quemada sale del cilindro y entra la mezcla fresca), se utilizan principalmente dos modelos. Estos modelos expresan dos conceptos [15]:

- Desplazamiento o barrido perfecto. Este primer modelo describe un proceso en el cual la mezcla fresca, al entrar durante la apertura de las lumbreras, reemplaza completamente los gases quemados que provienen de la anterior combustión, de manera que no existe cortocircuito de la mezcla fresca mientras no hayan sido evacuados todos los productos quemados.
- Mezcla perfecta. Este modelo propone un proceso de mezcla entre los gases quemados y la mezcla fresca que entra por las lumbreras. Esta mezcla se asume homogénea en

el interior del cilindro, de manera que desde el mismo instante en que se produce la entrada de gases frescos ya se están cortocircuitando parte de los mismos.

Este modelo trabaja, en teoría, con una aproximación a mezcla perfecta. Sin embargo, como se explica en otro apartado, durante el estudio del mismo se ha considerado un comportamiento intermedio entre ambos modelos. La elección de modelo se realiza con lo que se conoce como el ratio de mezcla, que va de 0 a 1, siendo 0 el equivalente al modelo de barrido perfecto (no se mezclan en absoluto los gases quemados con los frescos) y siendo el 1 el modelo de mezcla perfecta (se mezclan completamente).

4.2.6. Otras características

El resto de modelos como el modelo de pérdidas mecánicas y el de circuito hidráulico han sido simplificados. El motor 3S ICE se encuentra en una fase temprana de desarrollo y el objetivo del presente proyecto es demostrar la viabilidad del motor en el rango de operación concreto en el que se espera su uso para entonces llevar a cabo estudios más exhaustivos.

4.3. Configurando casos en VEMOD

La configuración de casos en VEMOD es uno de sus puntos fuertes, ya que la configuración de los elementos es directa y sencilla, así como de las condiciones impuestas.

Cada elemento tiene las características a definir programadas, de manera que en los menús aparecen campos o desplegados que se han de rellenar/elegir. Se muestran algunos ejemplos en la Figura 20.

Además, algunos de los campos pueden ser omitidos si suponen una información redundante. En el caso del 3S ICE, la relación de compresión dada en cada cilindro viene dada por la posición del actuador, por lo que al aparecer el campo *Compression ratio* en el menú de cualquiera de los cilindros, no hay que rellenarlo para evitar contradicciones.

Configurar adecuadamente cada elemento es fundamental en cualquier herramienta de cálculo, y VEMOD trata de facilitar esa configuración. Un ejemplo es el bloque motor, en una ventana con varias pestañas (Figura 21 aparecen todas las opciones relativas a la configuración general del mismo. Algunas de las mismas serían:

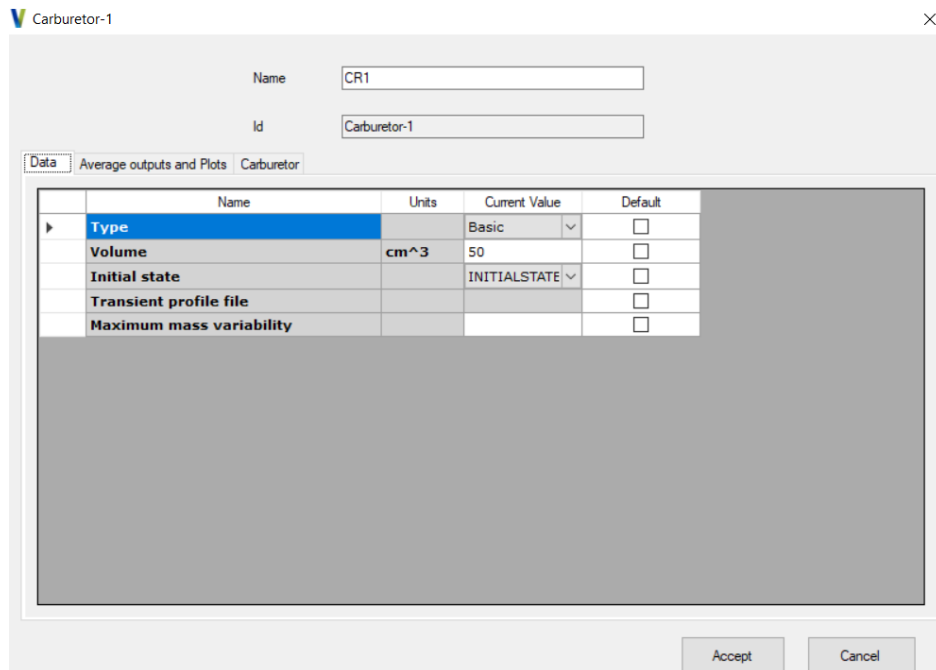


Figura 20: Menú con las opciones de un carburador - VEMOD

- *Model settings* donde se configuran o activan modelos de cálculo de combustión, de temperatura de pared, de transmisión de calor, barrido, etc.
- *Initial data* recoge los diferentes valores para la inicialización del caso.
- *Geometry* reúne las características geométricas de los pistones y su funcionamiento en el motor. Aquí se elige la opción de 2 pistones opuestos en cada cilindro.
- *Cam profile* determina el volumen de la cámara de combustión función de la posición del actuador.

El resto de las pestañas del bloque motor sirven para definir los modelos de transmisión de calor, barrido, hidráulicos en caso de haber sido activados.

Además, en la Figura 21 se observa además que algunos campos están rellenos con etiquetas en vez de con valores. Esta es una de las opciones de VEMOD: en valores que no vayan a ser constantes de inicio, puedes situar una etiqueta que puedes configurar en la ventana *Case Setup* (Figura 22) para generar distintos casos y obtener resultados de varias situaciones distintas a la vez, ya que la herramienta VEMOD tiene la capacidad de realizar cálculos en paralelo.

Para los elementos 1D hay una pestaña en la ventana de configuración del elemento que permite definir la malla, configuraciones de la fricción, etc. Por último, todos los elementos tienen una pestaña en la que se puede activar o desactivar la salida de datos relevantes

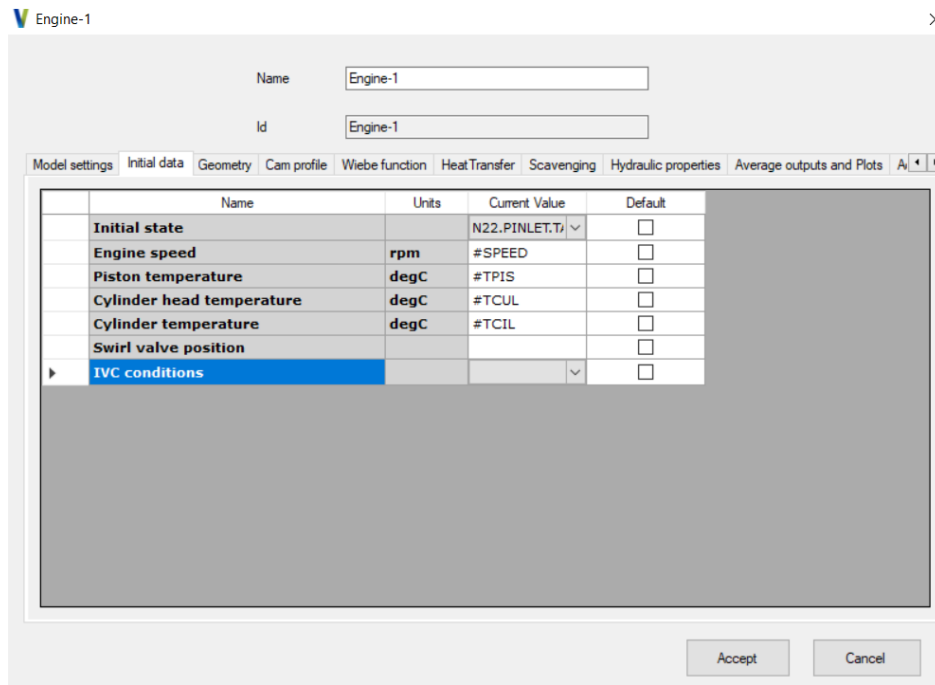


Figura 21: Menú del bloque motor - VEMOD

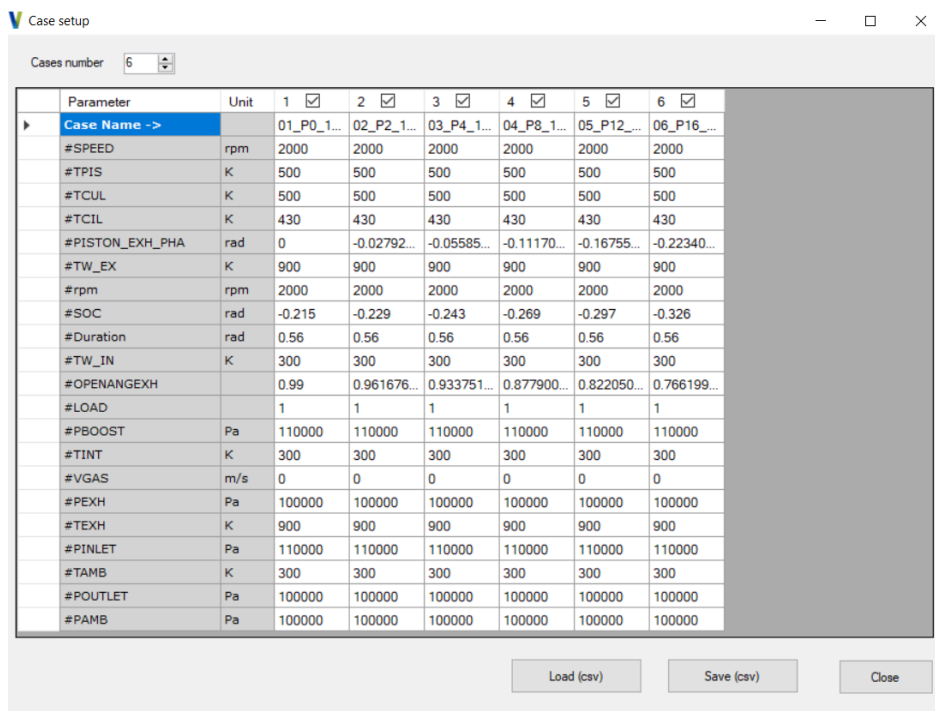


Figura 22: Ventana de configuración de los casos - VEMOD

del elemento en forma de datos medio del ciclo y datos instantáneos, lo cual permite ver la evolución de un gran número de variables: valores medios a lo largo de los ciclos o instantáneos a lo largo de un ciclo.

5. El motor 3S ICE en VEMOD

A continuación se va a presentar el modelo realizado por el CMT y el alumno para la representación del motor 3S ICE. Este modelo ha necesitado de diversas fuentes de información: la empresa InnEngine ha facilitado los documentos referentes a la patente entre otros, que muestran descripciones geométricas y de funcionamiento indispensables para el modelado. Por otra parte, se ha recurrido a diversos documentos bibliográficos para la información más genérica.

Así pues, cada pieza del modelo ha sido asignada con la geometría descrita y con las especificaciones termodinámicas que se han considerado correctas para un funcionamiento representativo del motor.

En la Figura 23 es posible ver los principales elementos que afectan al funcionamiento básico del motor. El sentido del flujo sigue la representación visual de las flechas (que son las *pipes*), es decir, de derecha a izquierda.

5.1. Descripción detallada del modelo

En el modelo visto, el flujo se inicia en el nodo 22, que representa las condiciones de contorno del ambiente en forma de condiciones iniciales del sistema. Las condiciones iniciales se separan en distintos puntos de trabajo, lo cual significa que se disponen varias configuraciones de condiciones iniciales que permiten inicializar el cálculo en algunos elementos.

En total el modelo dispone de 4 (tabla 4), y es importante asignar bien las condiciones a los elementos que las necesiten para facilitar y acelerar el cálculo. En ocasiones el cálculo es inviable si se introducen condiciones erróneas.

| - | Condición inicial | Escape | Nodo 22 (entrada) | Nodos 18 y 24 (salida) |
|--------------|-------------------|--------------|-------------------|------------------------|
| Presiones | P_{boost} | P_{escape} | $P_{entrada}$ | P_{salida} |
| Temperaturas | $T_{interna}$ | T_{salida} | $T_{ambiente}$ | $T_{ambiente}$ |

Cuadro 4: Etiquetas utilizadas en las condiciones iniciales

A través del conducto de admisión se llega al colector de admisión (*IntManifall*). Como se ha explicado, los conductos o *pipes* se modelan en 1D, seleccionando las condiciones iniciales, la geometría (longitud y diámetro) y las opciones de mallado, además de distintas opciones de fricción, transferencia de calor, etc. Se incluye una tabla con los valores geométricos de

| Conducto | Secciones | Longitud (m) | Diámetro (mm) |
|--------------------------------------|-----------|--------------|---------------|
| Admisión | 1 | 3.2 | 50 |
| Colector a depósito 1-4 | 1 | 0.87 | 50 |
| Colector a depósito 2-4 | 1 | 0.87 | 50 |
| 4x Depósitos admisión a carburadores | 1 | 0.5 | 50 |
| 4x Carburadores a cilindros (1/2) | 2 | 0.72 | 40 |
| Sección 2/2 | 2 | 0.72 | 31 |
| 4x Cilindro a colector de escape | 1 | 0.354 | 35 |
| 2x Colector de escape a escape (1/3) | 3 | 0.305 | 45 |
| Sección 2/3 | 3 | 0.01 | 60 |
| Sección 3/3 | 3 | 3.04 | 60 |

Cuadro 5: Valores geométricos de los conductos

| Elemento | Volumen (cm^3) | Inicialización |
|-----------------------|--------------------|-------------------|
| Colector de admisión | 13632 | Nodo 22 (entrada) |
| Depósitos de admisión | 50 | Nodo 22 (entrada) |
| Carburadores | 50 | Condición inicial |
| Colector de escape | 50 | Escape |

Cuadro 6: Características de los elementos 0D

los conductos (tabla 5). Puesto que no aparecen numeradas en la imagen del modelo, se nombrarán según los elementos principales que conectan.

Por otra parte, los colectores y depósitos se modelan como elementos 0D y se configuran con opciones de transmisión de calor, geometría (volumen) y condición inicial. La condición inicial se elige en función de su finalidad (colector de admisión/escape llevarán las condiciones de entrada/escape). Otra tabla se adjunta con los volúmenes de los elementos 0D (tabla 6).

Desde aquí empieza el recorrido descrito en el apartado de descripción del motor. El flujo se divide en dos primeras ramas que llevarán a los depósitos de admisión (*Junks*) previos a la entrada a los cilindros.

El aire pasa por los depósitos de admisión 1-4 y 2-3, que son elementos 0D que facilitan el cálculo en intersecciones de 3 o más elementos 1D (las tuberías). Los nodos visibles a la entrada de los depósitos (N25 y N26) simulan una entrada sin pérdidas a los depósitos, mientras que los nodos de salida sí se configuran con un coeficiente de descarga.

Lo mismo ocurre con las parejas de nodos que rodean los carburadores a los que llega el

aire tras volver a dividirse en el camino a los 4 cilindros. Los carburadores están configurados de manera que inyectan un total de combustible tal que el dosado es 1 siempre.

A continuación la mezcla fresca llega a su cilindro correspondiente. Como se ha dicho en la descripción, los cilindros 1 y 2 queman al mismo tiempo, mientras que el 3 y el 4 queman con un desfase de 90° respecto a los primeros. Una vez acabada la combustión, el modelo de barrido vacía el cilindro empujando la mezcla quemada y parte de la mezcla fresca (aparece masa de cortocircuito) hacia el escape. Los cilindros están configurados con un ratio de mezcla de 0.5, lo que significa un proceso intermedio entre mezcla perfecta y barrido perfecto.

En un principio se realizaron los cálculos con un ratio de mezcla de 1 (mezcla perfecta), pero se decidió que, dado el carácter de este proyecto (basado en la viabilidad y el comportamiento general del motor), utilizar un ratio de 0.5 permitiría obtener comportamientos cuyos resultados serían más flexibles en caso de que el motor acabara con un funcionamiento más similar a barrido perfecto.

El funcionamiento del escape es similar al de la admisión: como el flujo de 2 cilindros va a parar a un escape, se introduce un depósito 0D que conecte los tres elementos unidimensionales. Por último, dos nodos hacen la función del escape de cada línea de flujo.

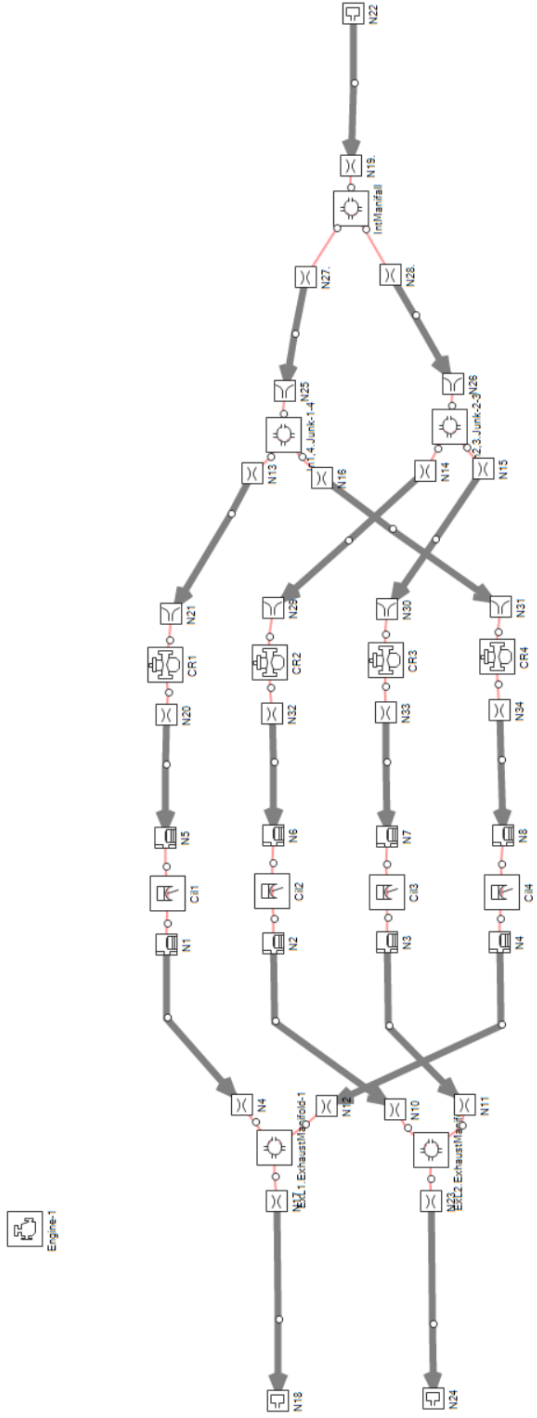


Figura 23: Modelo 1D del motor 3S ICE de ImmEngine en VEMOD

5.2. Primeros pasos del proyecto - Debugging

Cuando se inicia esta proyecto se parte de un modelo no acabado, de manera que la primera tarea a realizar es poner a punto el modelo antes de poder utilizarlo para obtener datos relevantes. Para ello se emplea una enorme cantidad de tiempo en distintas correcciones y desarrollos de herramientas.

En primer lugar, se procede a corregir la geometría de todos los elementos presentes en el modelo. Las *pipes* están configuradas de manera que pueden tener múltiples secciones con distinto diámetro, existiendo así ensanchamientos y estrechamientos que permiten emular las condiciones reales. Al inicio del proyecto el modelo contaba con una geometría mal configurada, de manera que se corrigen todas las longitudes y diámetros. Este error también se encontraba en los volúmenes de los carburadores y del colector de admisión.

Además de los problemas de geometría, VEMOD cuenta con opciones de mallados para el cálculo en los elementos 1D. Estas opciones estaban, de nuevo, mal configuradas, por lo que se procede a su corrección para que la herramienta pueda funcionar como se espera.

Una vez resuelta la geometría y mallado, con la configuración de casos correcta se obtienen los primeros resultados del modelo. Tras observar la disparidad de los mismos con los resultados esperados, se procede a tratar de encontrar errores restantes. Entre las muchas opciones de configuración del bloque motor, se observa en los instantáneos que el modelo quemaba todo el combustible instantáneamente.

Esto daba lugar a situaciones de: Picos de presión y temperatura máximas mucho mayores de las esperadas. Suponen esfuerzos mecánicos superiores a los estándar para la situación impuesta. También aparecen valores de par y potencia muy superiores a los esperados, afectando a la media proporcionada por ciclo.

El modelo utiliza para la combustión la ley de Wiebe, y se pudo ver que estaba mal aplicada. Tras una recolección de información, se establecieron los nuevos parámetros de la combustión para obtener algo más aproximado a lo esperado, obteniendo la ley de combustión que se puede ver en Figura 24. La duración y el punto de inicio de combustión varían en función de la velocidad de giro y la posición del actuador.

En tercer lugar se corrigieron características del combustible. Algunos datos como la densidad, el ratio hidrógenos - carbonos, etc estaban mal configurados. Arreglarlos supuso una mejora en los resultados obtenidos de la combustión.

A lo largo de este proceso de corrección del modelo se fue diseñando un código en la

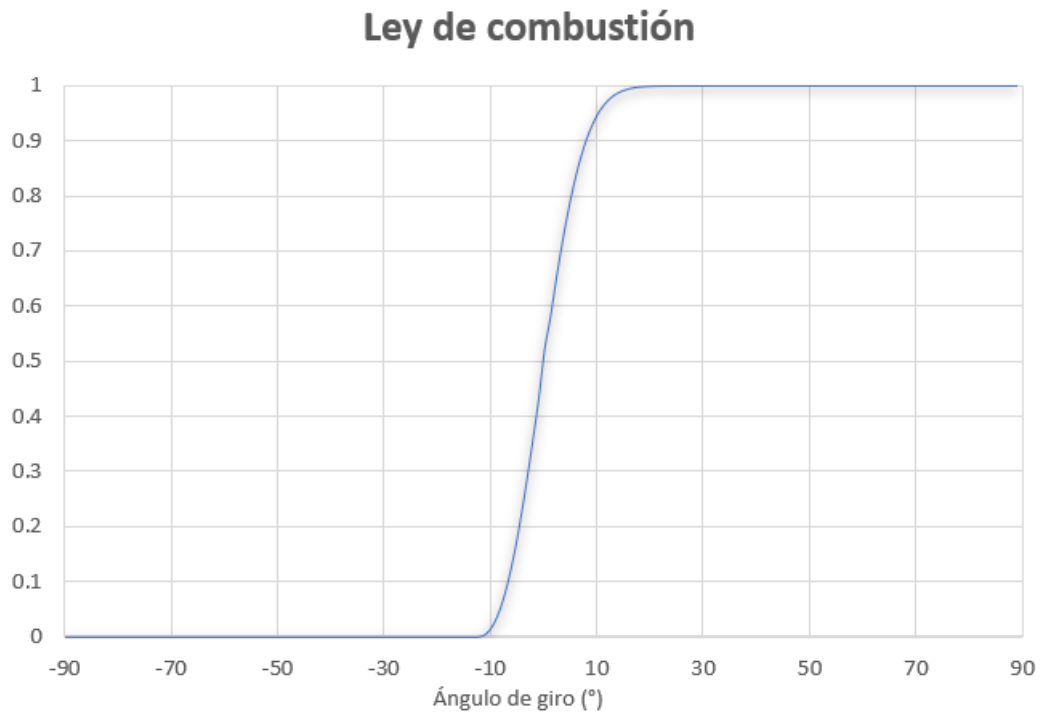


Figura 24: Ley de combustión

herramienta MATLABTM que permite representar gráficamente de manera semi-automática los resultados importantes para el análisis. Esta herramienta permite variar rápidamente los grupos de resultados que se obtienen como salida en forma de gráficas.

Llegado a un punto del desarrollo del modelo del motor, se utiliza incluso para comparar los resultados del mismo con los experimentales para validar el modelo. En secciones posteriores se incluyen gráficas como las mencionadas.

Una vez se validan los resultados, se procede a reunir una base de datos con cálculos de distintos casos.

5.3. Primeros casos del modelo y validación

Como se ha dicho en otros puntos, el CMT realizó ciertos ensayos con el motor obteniendo unos resultados y valores. A partir de estos, se realizó un modelo en forma de código XML que, mediante OpenWAM, permitía realizar cálculos. Para poder tener una interfaz mucho más cómoda y eficaz a la hora de realizar cambios en elementos/casos, se diseñó la interfaz que ahora utiliza VEMOD. El XML se realizó y validó con los datos de la campaña experimental, y después se utilizó como base para construir la interfaz.

| Nº Caso | Posición | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Grado de carga (%) |
|---------|----------|-------------------------|-------------------|--------------------|
| 1 | 2 | 2000 | 1.05 | 60 |
| 2 | 2 | 2000 | 1.25 | 60 |
| 3 | 2 | 2000 | 1.50 | 10 |

Cuadro 7: Algunos de los primeros casos realizados con la interfaz

Los primeros casos realizados con el modelo del 3S ICE en VEMOD corresponden a recorridos de grado de carga en bajas presiones. En concreto, estos serían 3 de los casos cuyos resultados se estudian para comprobar que efectivamente los valores convergen y están ofreciendo una solución estable. Esto sirve para, antes de comprobar que el modelo sea correcto, funciona.

- Durante todo el proyecto, se mantienen constantes ciertos valores, pues son parámetros de configuración que no son controlables en la conducción y su valor se introduce de manera que permita cálculos coherentes. Al introducir los valores en la pestaña de *Case setup* se debe hacer en unidades del sistema internacional (Kelvin, Pascales, metros por segundo, radianes, ...). Se muestran en la tabla 8, con los nombres que corresponden a las etiquetas mostradas en 22.
- En el apartado de explicación del motor se ha indicado qué significan las posiciones del actuador, y qué valores de desfase en radianes implican. Por ello, cuando se especifique la posición de actuador que se usa en cada caso no se indicarán los valores concretos del desfase.
- En el apartado del modelo de combustión de VEMOD han sido indicados los valores de TOC y SOC para cada velocidad de giro en las distintas posiciones. Por tanto, cuando la posición y la velocidad de giro se especifiquen no se indicarán los valores concretos de TOC/SOC.

| | | | | |
|-----------|-------|-------|-----------|-----------|
| TPIS | TCIL | TW-EX | TW-IN | PBOOST |
| 500 K | 430 K | 900 K | 300 K | 110000 Pa |
| PEXH | TEXH | TAMB | POUTLET | PAMB |
| 100000 Pa | 900 K | 300 K | 100000 Pa | 10000 Pa |

Cuadro 8: Valores de inicialización comunes para todos los casos presentados en el documento

Tal y como se ha dicho, en la tabla 8 aparecen las etiquetas correspondientes a la pestaña de *case setup*. *TPIS* corresponde a la temperatura de la cabeza del pistón, *TCIL* a la temperatura del cilindro, *TW-IN* y *TW-EX* son las temperaturas de pared exterior y interior del cilindro respectivamente, mientras que *TEXH* es la temperatura de escape. Para las presiones: *PBOOST* es la presión de sobrealimentador, *PEXH* es la presión de escape,

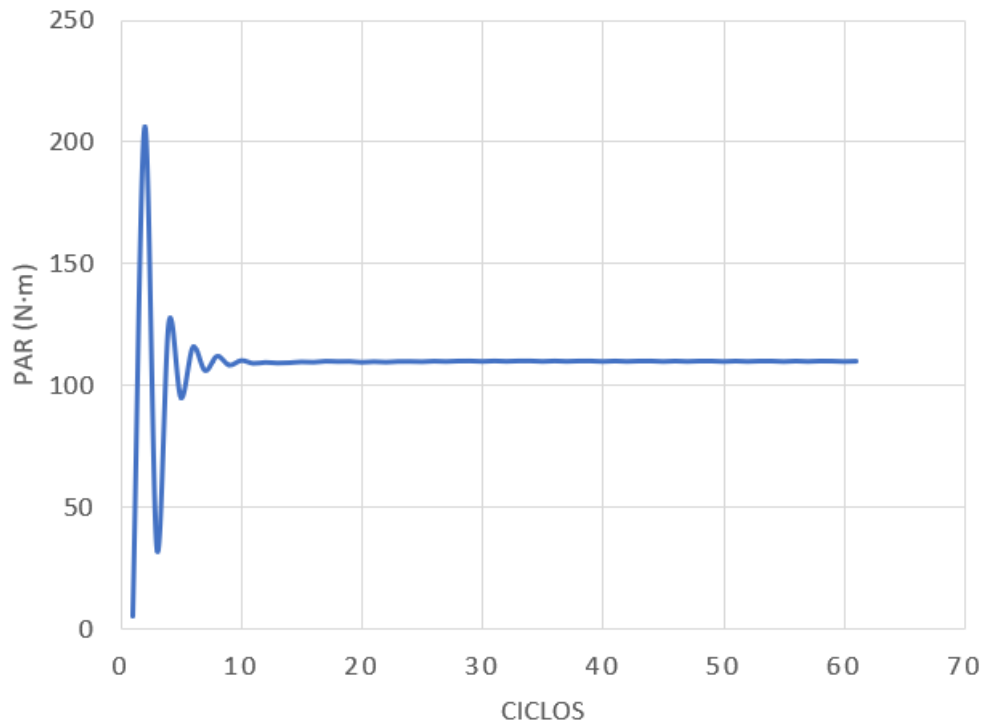


Figura 25: Par convergiendo a lo largo de los ciclos

POUTLET es la del exterior y *PAMB*, *TAMB* son las condiciones ambiente. Se utiliza también la etiqueta *VGAS*, que es la velocidad media del gas, cuyo valor (0 m/s) es necesario únicamente por temas de inicialización de cálculo.

Con los casos listos y el modelo funcionando, se obtienen los resultados para la verificación. Como se ha mencionado, se comprueba que los resultados hayan convergido al final del cálculo (figura 25, para poder tomar los resultados como válidos para una posterior validación. En caso de que no haya convergido se habría de comprobar que el modelo funcione correctamente.

Las figuras 25 y 26 se utilizan como ejemplo. Durante el proceso se comprobó la convergencia de numerosos parámetros considerados importantes, como el gasto, la potencia, temperaturas máximas y diversas presiones, entre otras. En la validación que se presenta a continuación, se han utilizado como principales referencias distintas presiones de los alrededores del cilindro número 1.

Cuando se tuvo comprobado que los modelos que se utilizaban en la interfaz permitían obtener resultados válidos, se llevó a cabo el proceso de ajuste del modelo al motor correspondiente. Con el objetivo de conseguir que el modelo se comporte como el prototipo de 3S ICE ensayado en el banco se utilizan como base los datos experimentales de los ensayos. Para ello, realizando nuevos casos (tabla 9) se fija el valor obtenido de par en el banco (entre otros), a una régimen de giro y presión concretos, y se busca conseguir ese mismo par inten-

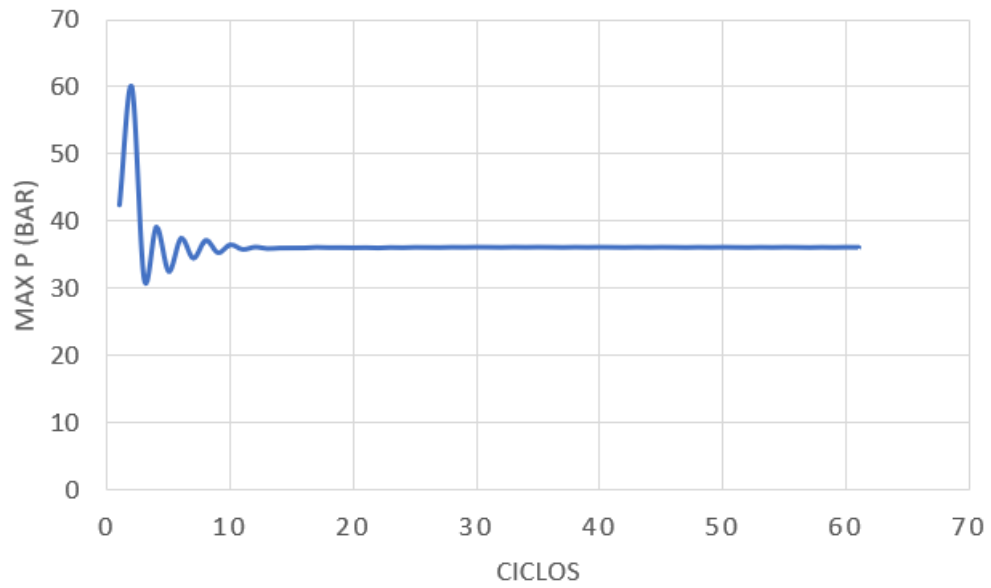


Figura 26: Presión convergiendo a lo largo de los ciclos

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Grado de carga (%) |
|----------|-------------------------|-------------------|--------------------|
| 2 | 1000 | 1.1 | 100 |
| | 1000 | 1.05 | 100 |
| | 2000 | 1.05 | 100 |
| | 2000 | 1.1 | 100 |
| | 2500 | 1.1 | 100 |

Cuadro 9: Casos usados para la validación del modelo en interfaz

tando que el resto de valores sean lo más parecidos posibles a los que el ensayo ha mostrado. El procedimiento entonces consiste en:

- Se lanzan varios puntos correspondientes a los puntos de los que se tienen datos experimentales, con las mismas condiciones de funcionamiento (grado de carga, rpm, etc.), buscando obtener el mismo valor de salida en, por ejemplo, par.
- Ajustando el modelo se busca mantener esa salida mediante el ajuste de todo el proceso interno de los cilindros. Para ello se utilizan distintas variables, como por ejemplo las presiones (figuras 27 y 28) de los cilindros.
- Una vez ajustado el funcionamiento, viendo que la salida es la misma, se declara validada la nueva iteración del modelo.

Queda entonces validado el modelo del motor 3S ICE realizado en VEMOD y dan inicio los cálculos para la base de datos.

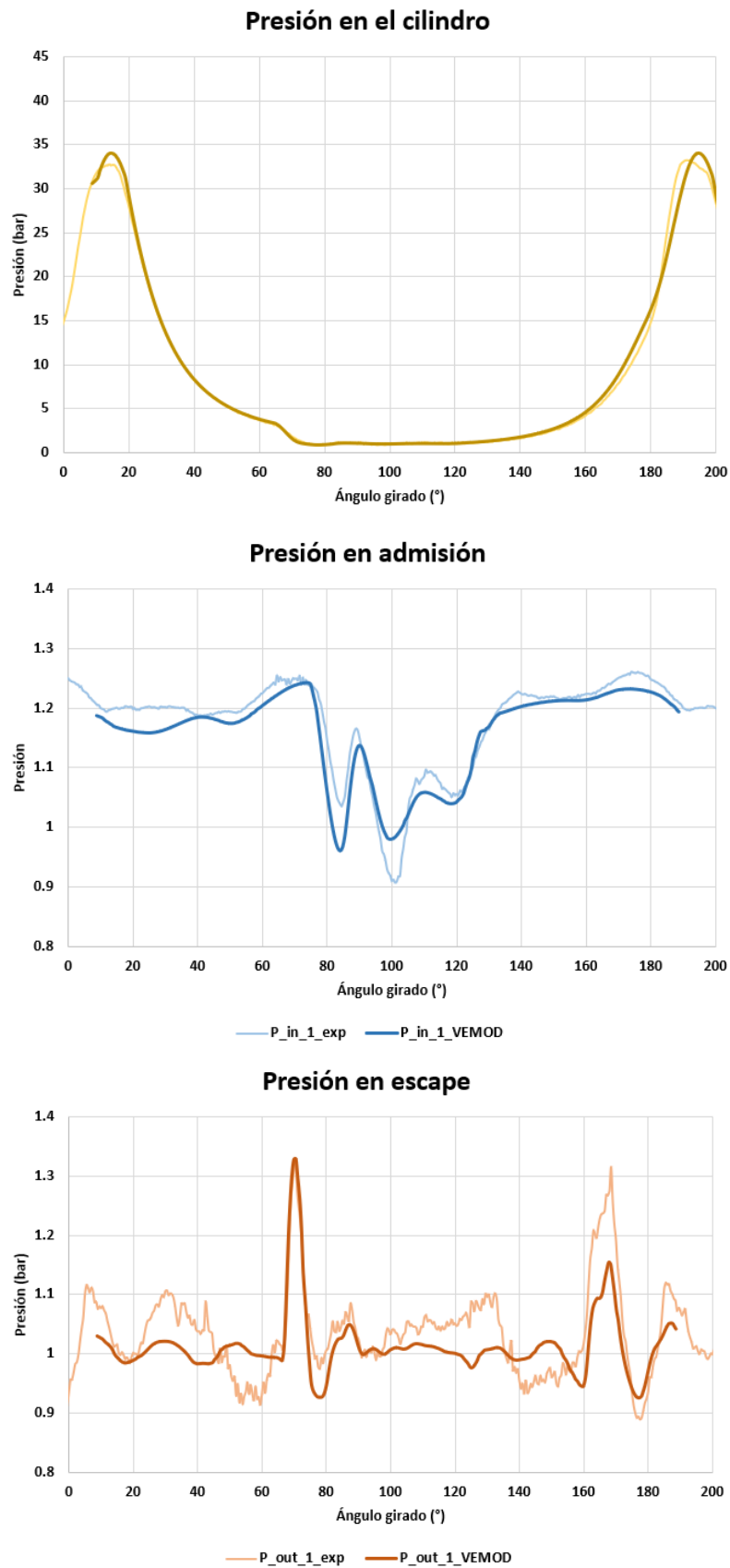


Figura 27: Valores de presión en el cilindro 1 para el punto de 1000 rpm, par = 60 N·m

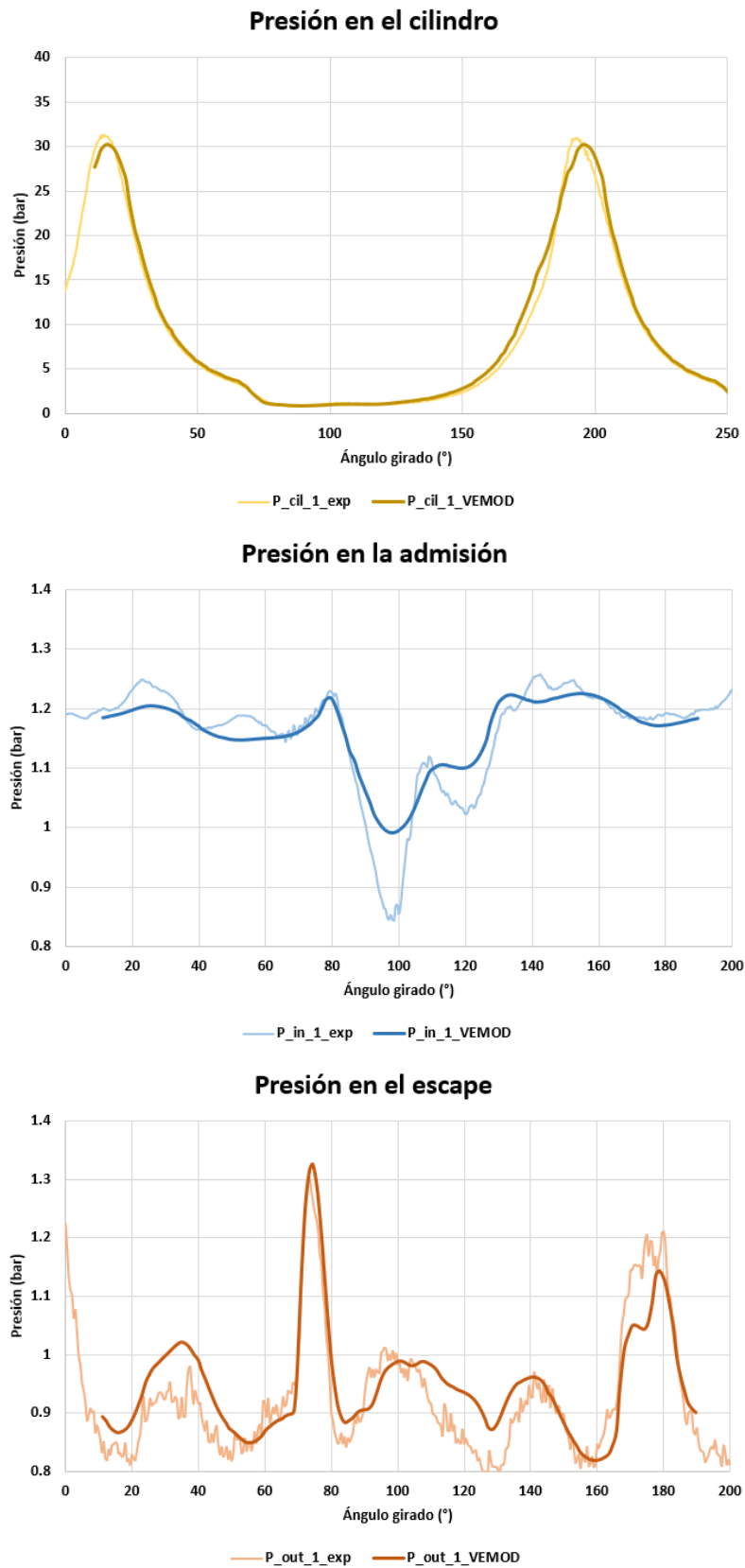


Figura 28: Valores de presión en el cilindro 1 para el punto de 2000 rpm, par = 60 N·m

6. Estudios y baterías de casos

6.1. Introducción a los estudios

Tras validar el modelo, dan inicio los estudios paramétricos con el objetivo de utilizar el motor como un *Range extender* en un vehículo híbrido. El objetivo de esto es obtener el rango de parámetros en los que el motor presenta el punto óptimo del balance prestaciones-consumo.

Dada la supuesta funcionalidad del motor (uso en vehículos híbridos, con el objetivo de reducir al máximo el consumo) se establecerá como óptimo generalmente el punto de consumo mínimo con mayores prestaciones, siempre y cuando sean condiciones a las que el motor pueda operar de manera segura. En el caso de que ese punto apareciera en una velocidad de giro superior a 4000 rpm u otros puntos en funcionamientos extremos, pasará el punto elegido al siguiente óptimo, así hasta que entre en valores razonables de utilización.

Puesto que el objetivo es encontrar un área de funcionamiento concreta para los principales parámetros del motor, se llevan a cabo estudios con distintas baterías de casos que forman una extensa base de datos para poder realizar un análisis con la mayor exactitud posible teniendo en cuenta las limitaciones del modelo.

En los distintos estudios se analizan principalmente el par y la potencia obtenidos por el motor como prestaciones y el consumo específico que presenta para ello. Además, se tendrán en cuenta diversos factores que representan el proceso de renovación de la carga, como los coeficientes de carga, llenado y admisión o los rendimientos de barrido y de retención. Puesto que se utilizan parámetros como la masa de referencia, la retenida o la suministrada, se adjunta la figura 29 que muestra el valor que representa cada uno.

A razón del proceso de estudio distinto, se adjuntan en el presente documento las configuraciones de los numerosos casos utilizados. En este punto se explica el objetivo de cada batería de casos, que aparecen acompañadas de los mapas obtenidos mediante el *script* de MATLABTM desarrollado para dicho propósito junto con análisis de los mismos.

6.2. Elección del ratio de mezcla

En este documento se ha comentado en puntos anteriores que se selecciona un ratio de mezcla de 0.5 (de un rango de 0 a 1, siendo 0 barrido perfecto y 1 mezcla perfecta), pero

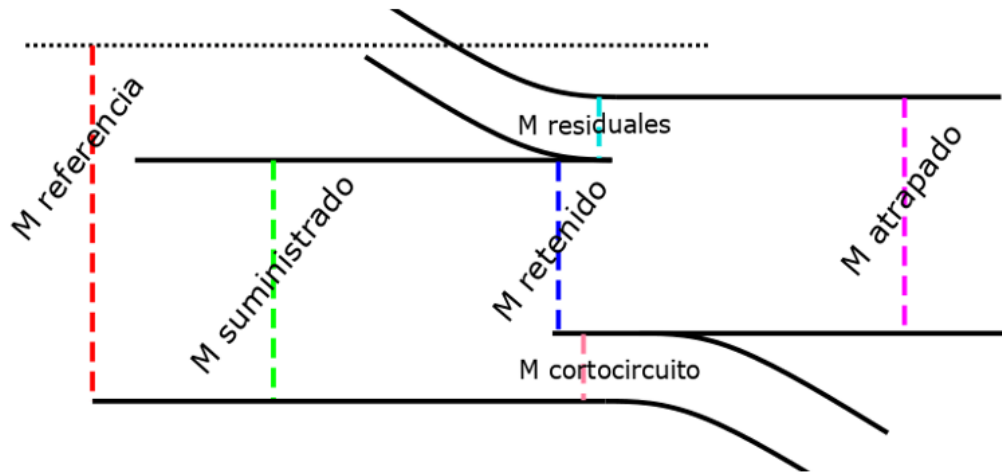


Figura 29: Diagrama de flujo de un motor de 2T, válido para el 3S ICE

cuando se validó el modelo se trabajaba con un ratio de 1.

Se realiza entonces un estudio viendo las diferencias de funcionamiento del motor entre los extremos del ratio de mezcla, utilizando baterías de casos del resto de estudios paramétricos utilizados en este proyecto, con el objetivo de averiguar también si trabajar con el ratio intermedio es una opción viable, además de tener los datos de la mezcla y el barrido perfectos.

Dicho estudio se realiza con una batería de casos compuesta por hasta 3 de las distintas posiciones del actuador (2mm, 6mm y 12mm), con saltos de 500 rpm en la velocidad de giro y de 0.1 bar en la presión obteniendo así los siguientes conjuntos de datos:

| Posición | Ratio de mezcla | Velocidades de giro | Presiones de admisión |
|----------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| 2 | 0 | 500-4000 rpm | 1.05-1.55 bar |
| | 0.5 | 500-4000 rpm | 1.05-1.55 bar |
| | 1 | 500-4000 rpm | 1.05-1.55 bar |
| 6 | 0 | 500-4000 rpm | 1.05-1.55 bar |
| | 0.5 | 500-4000 rpm | 1.05-1.55 bar |
| | 1 | 500-4000 rpm | 1.05-1.55 bar |
| 12 | 0 | 500-4000 rpm | 1.05-1.55 bar |
| | 0.5 | 500-4000 rpm | 1.05-1.55 bar |
| | 1 | 500-4000 rpm | 1.05-1.55 bar |

Cuadro 10: Batería de casos utilizados par el estudio del ratio de mezcla

Como se demuestra en puntos posteriores del documento, las distintas posiciones del actuador afectan a los resultados de las prestaciones, pero para el estudio que se está mos-

trando no es necesario mostrar todas las posiciones utilizadas. Por ello, a continuación se muestran únicamente los resultados de la posición 2, que ha sido la utilizada como estándar en el proyecto.

La diferencias entre los distintos valores de ratio de mezcla afectan muy poco a las prestaciones, especialmente para los ratios 0.5 y 1 de mezcla . Tiene sus efectos en el modelo y en el cálculo, y puede tener una influencia notable en valores de la combustión, pero al ser las prestaciones (figuras 31 y 32) y el consumo (30) tan similares se deduce que se puede elegir uno u otro indistintamente. Así, siguiendo la explicación anterior, se escoge el valor de 0.5 para el ratio de mezcla.

6.3. Estudio de sobrealimentación de la admisión

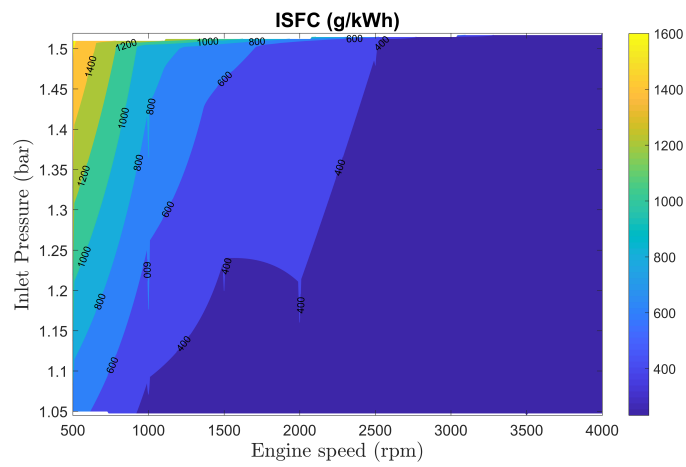
A pesar del objetivo mencionado, los desarrolladores del 3S ICE pidieron al departamento averiguar, entre otras cosas, si fuera viable la posibilidad de sobrealimentar el motor con un turbogrupo. A raíz de la petición, se genera una batería de casos que permite observar el funcionamiento del motor en un rango de presiones de admisión entre 1 bar y 1.6 bar, emulando una admisión sobrealimentada.

En la tabla 11 se muestra un resumen de los casos utilizados en el estudio, mientras que en el anexo se muestra el desglose de todos ellos. Se usa un ratio de mezcla de 0.5, los saltos de velocidad de giro de un caso al siguiente son de 500 rpm y los saltos de presión tienen un valor de 0.1 bar.

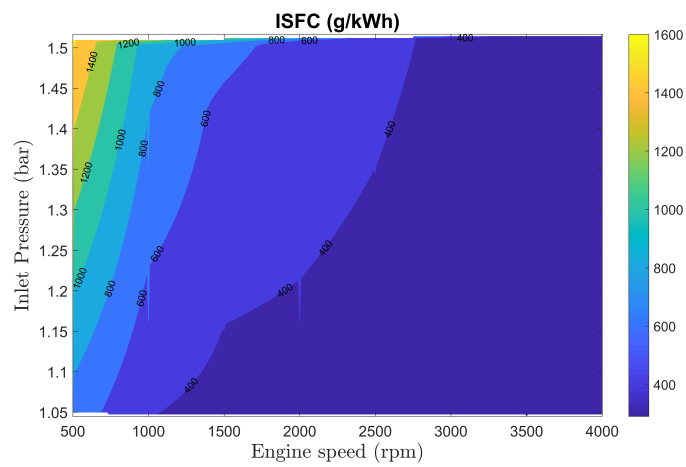
| Posición | Casos | Rango de velocidad de giro | Rango de presiones de admisión |
|----------|---------|----------------------------|--------------------------------|
| 0 | 1-48 | 500-4000 rpm | 1.05-1.55 bar |
| 4 | 49-96 | 500-4000 rpm | 1.05-1.55 bar |
| 8 | 97-144 | 500-4000 rpm | 1.05-1.55 bar |
| 12 | 145-192 | 500-4000 rpm | 1.05-1.55 bar |
| 16 | 191-240 | 500-4000 rpm | 1.05-1.55 bar |

Cuadro 11: Batería de casos utilizados par el estudio de la viabilidad de sobrealimentación.

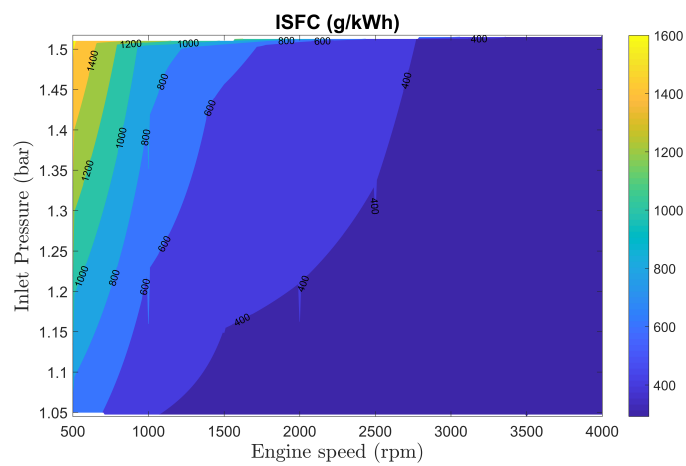
Una vez procesado el resultado del cálculo de la batería de casos se obtienen diversos mapas que permiten observar el comportamiento del motor frente a la sobrealimentación. Para el estudio actual, presentar todas las posiciones sería redundante, puesto que las presiones afectan de manera similar a las mismas. Las diferencias se comentan mediante la comparación de dos posiciones lejanas (posición 4 mm y posición 12 mm en este caso).



(a) Barrido perfecto

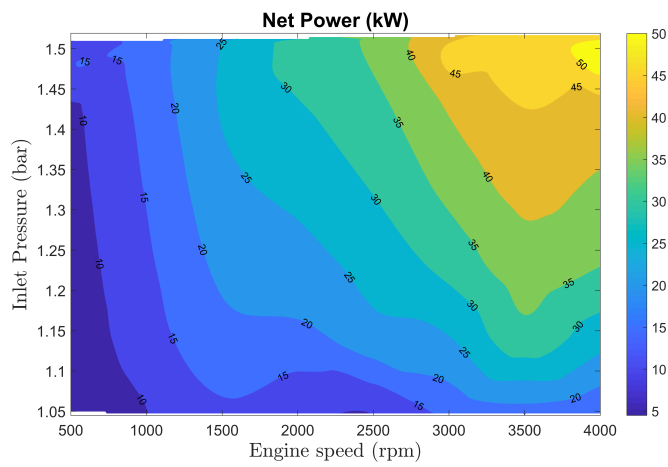


(b) Mezcla perfecta

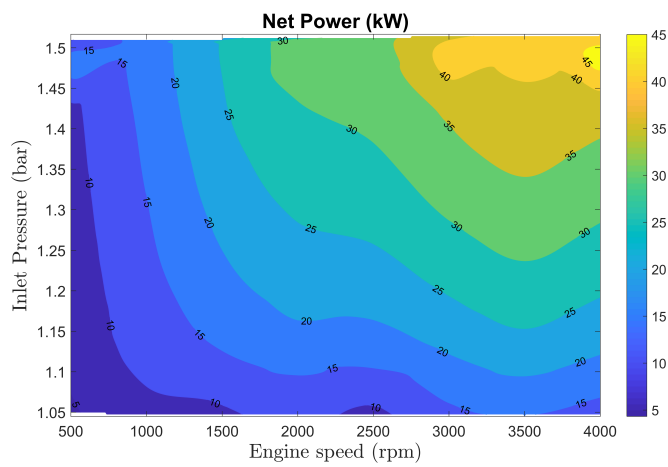


(c) Ratio de mezcla 0.5

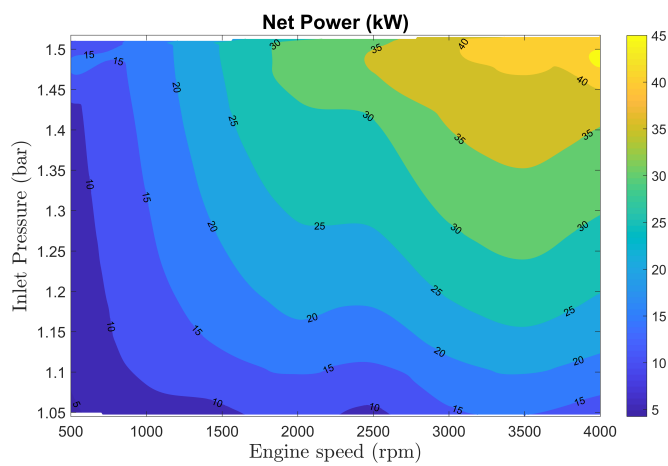
Figura 30: Comparación de consumo específico para los ratios de mezcla 0 (barrido), 1 (mezcla) y 0.5 respectivamente



(a) Barrido perfecto

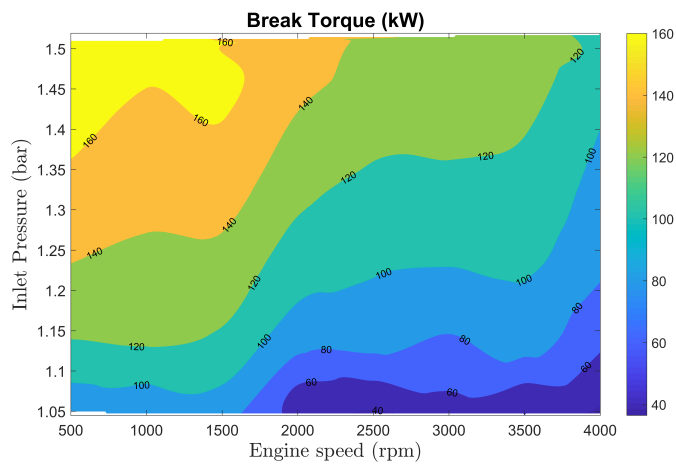


(b) Mezcla perfecta

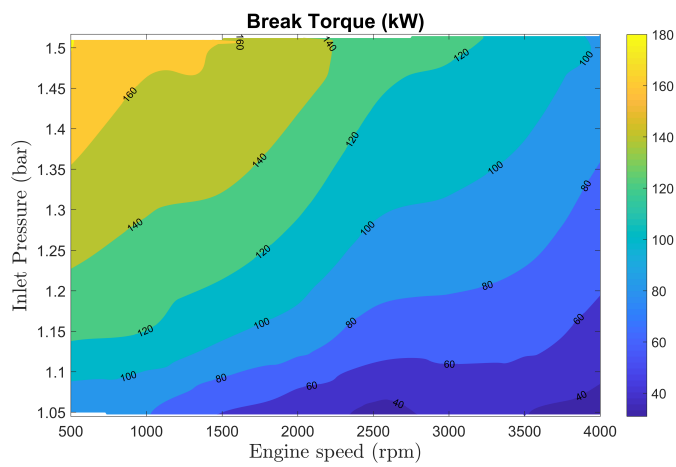


(c) Ratio de mezcla 0.5

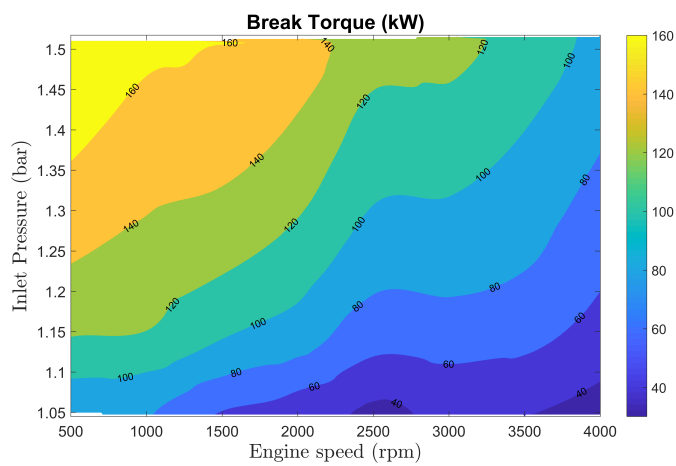
Figura 31: Comparación de potencia para los ratios de mezcla 0 (barrido), 1 (mezcla) y 0.5 respectivamente



(a) Barrido perfecto



(b) Mezcla perfecta



(c) Ratio de mezcla 0.5

Figura 32: Comparación de par generado para los ratios de mezcla 0 (barrido), 1 (mezcla) y 0.5 respectivamente

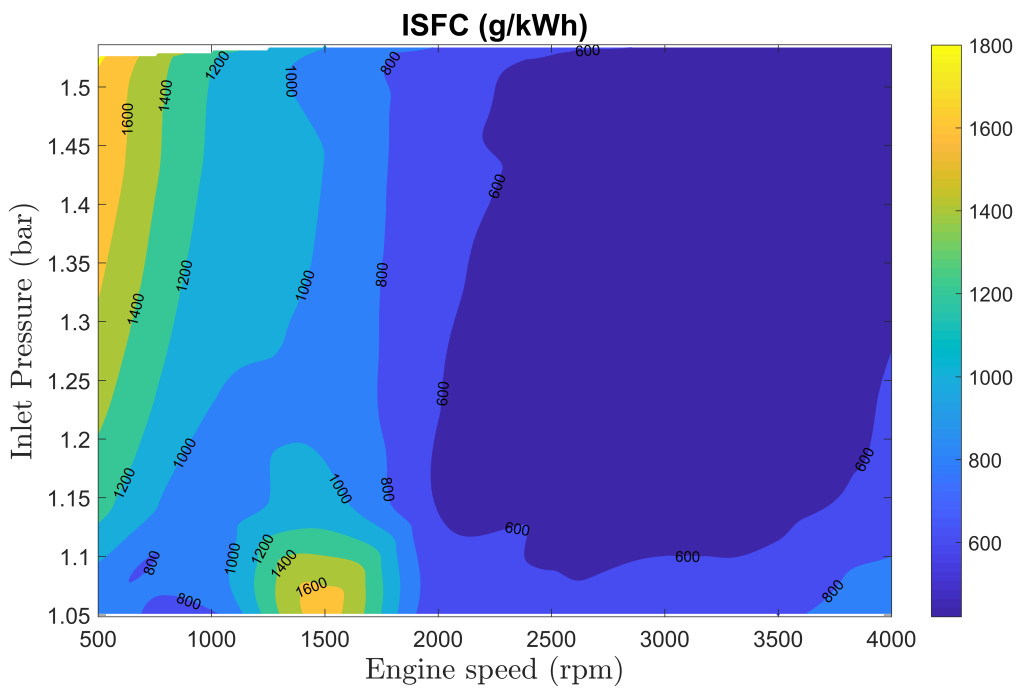
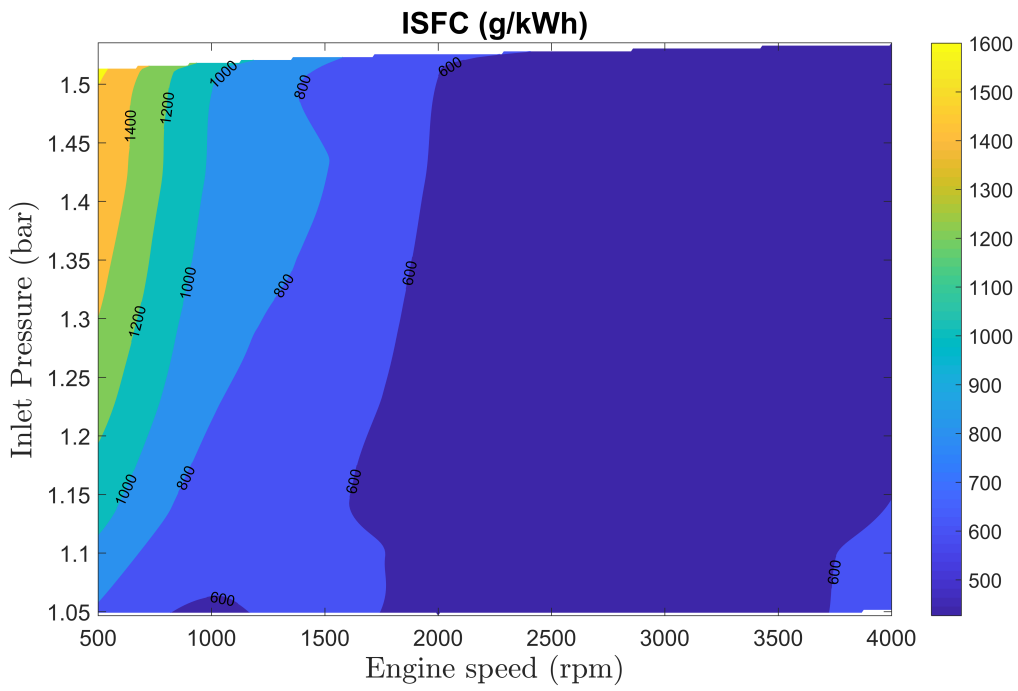


Figura 33: Consumo específico para distintas posiciones

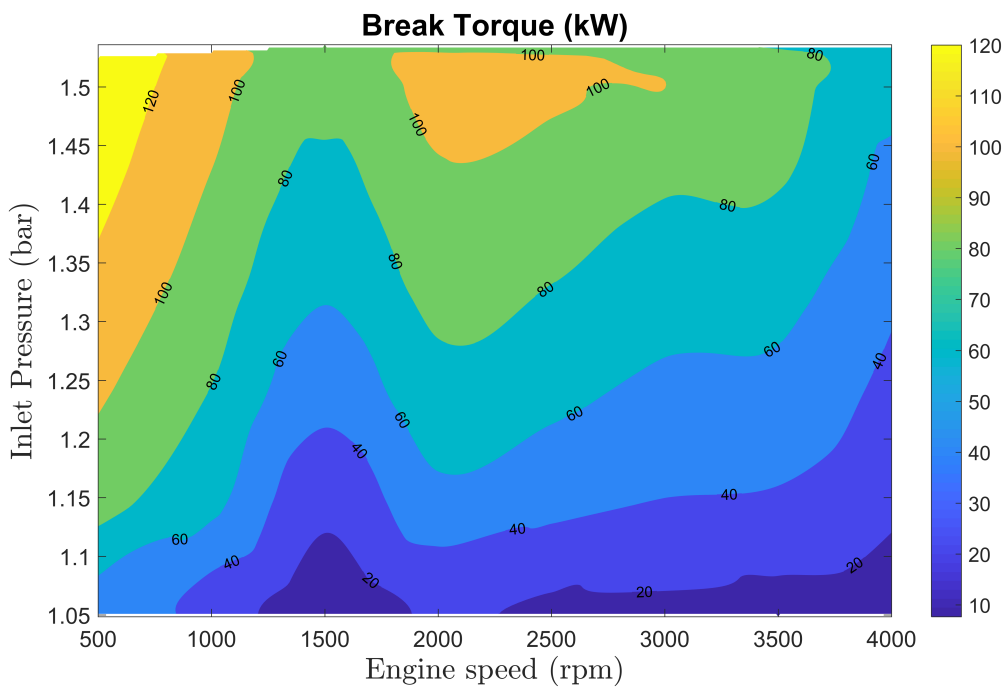
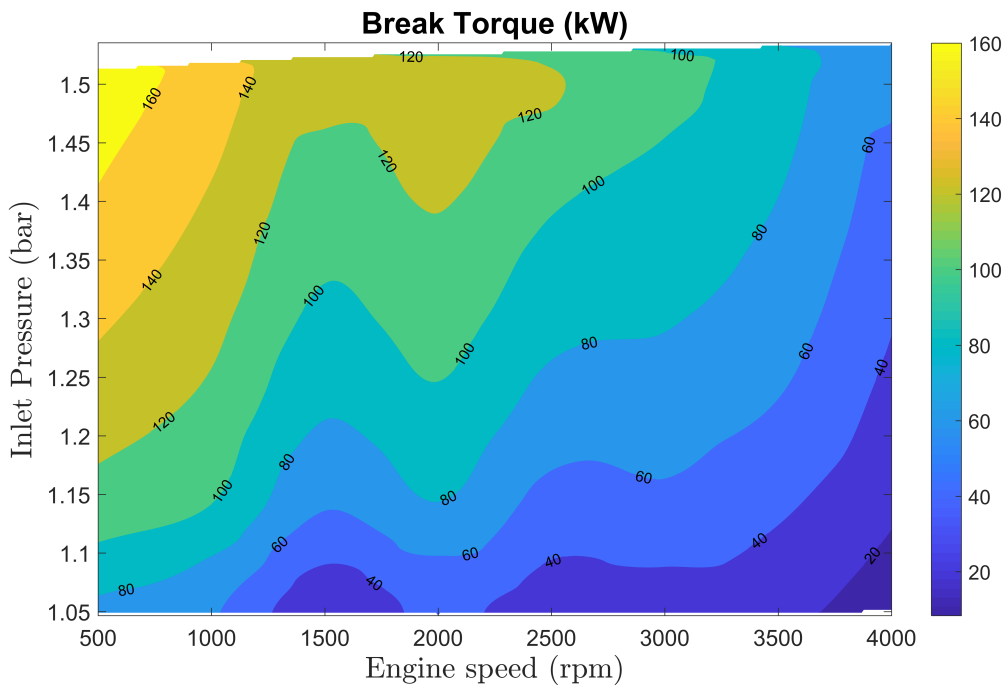


Figura 34: Par generado para distintas posiciones

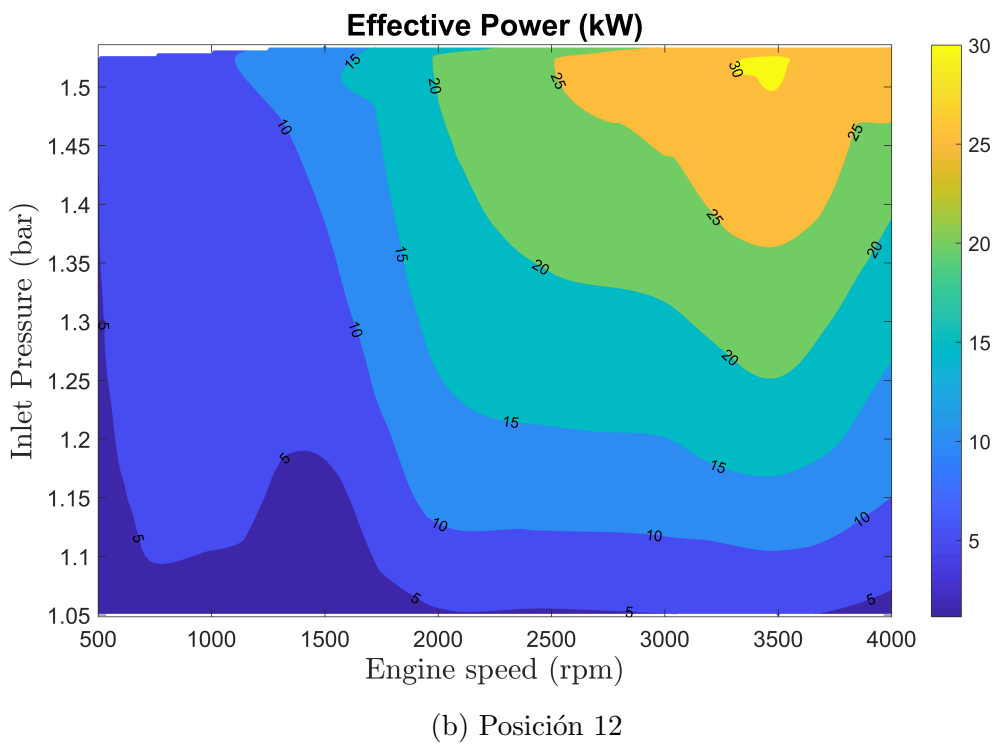
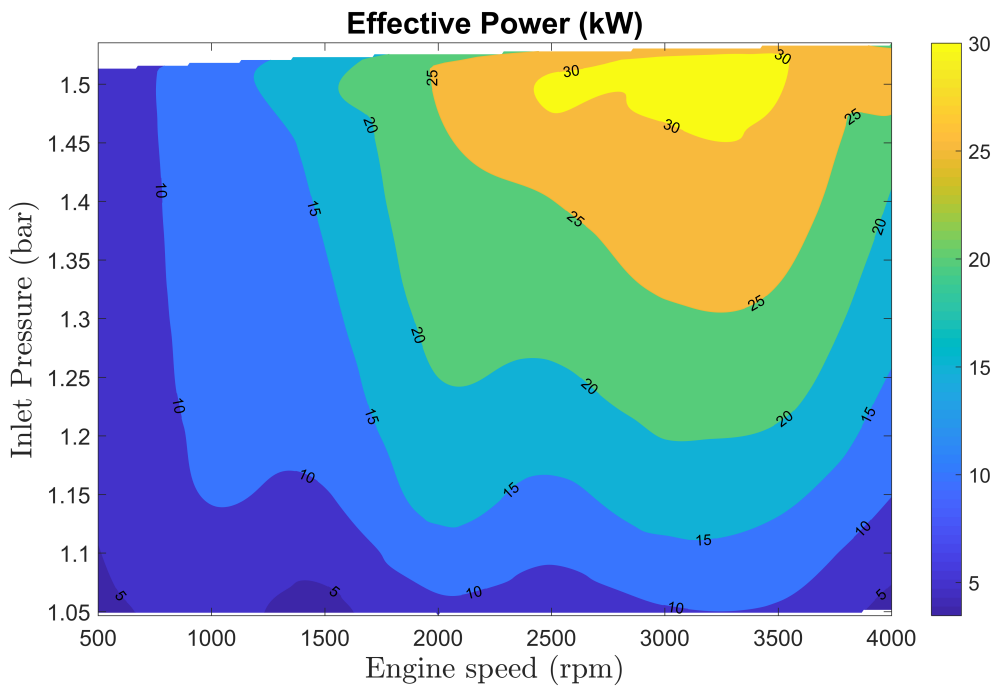
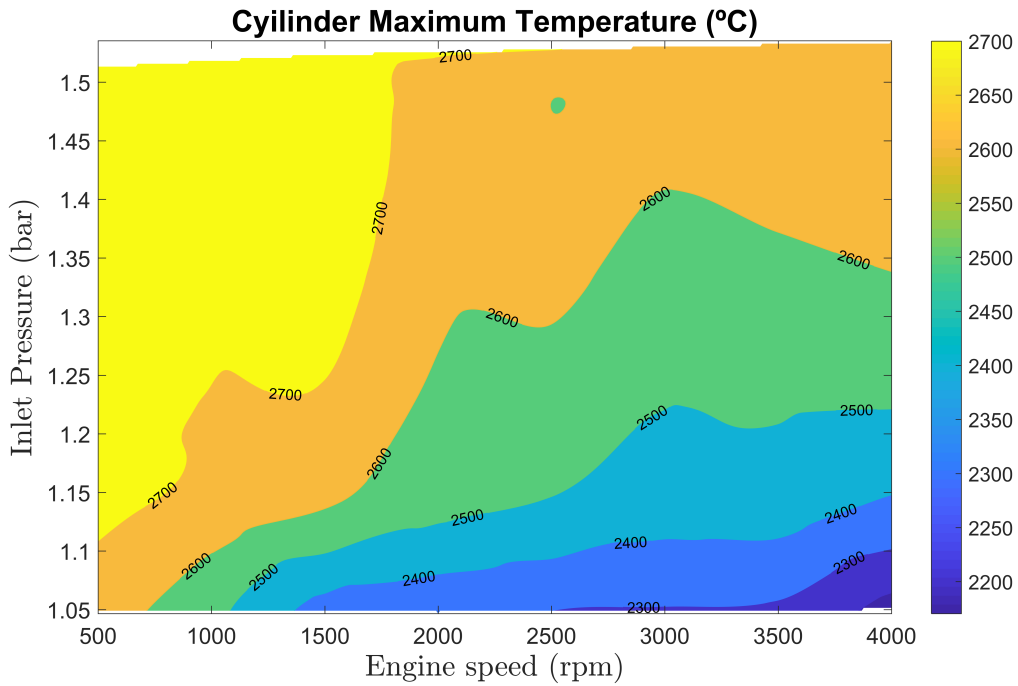
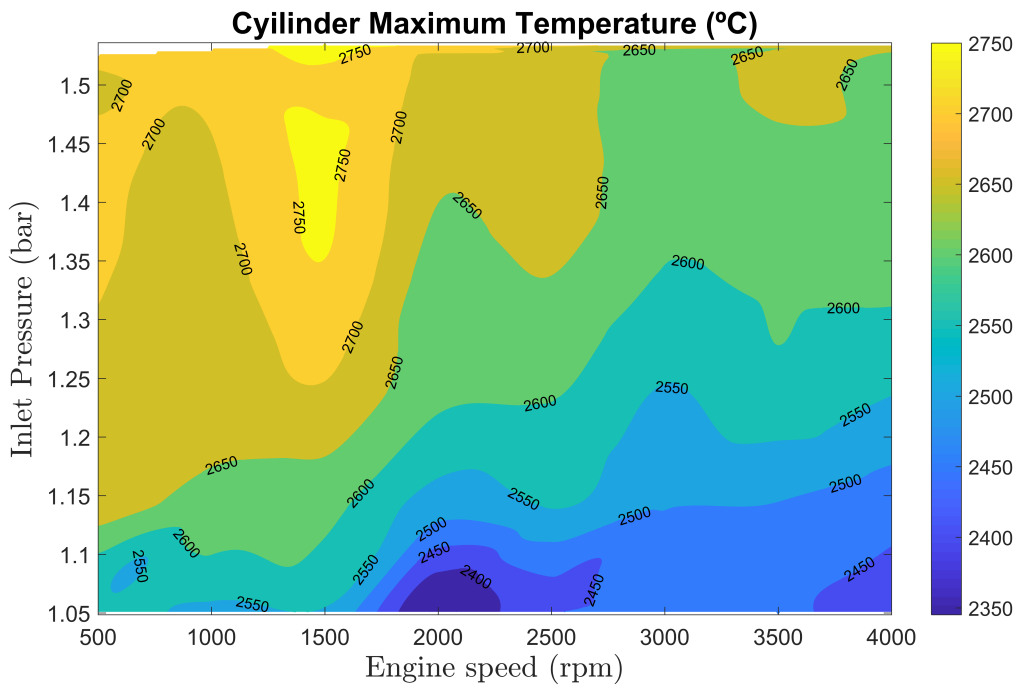


Figura 35: Potencia efectiva producida para distintas posiciones



(a) Posición 4



(b) Posición 12

Figura 36: Temperaturas máximas en el interior del cilindro

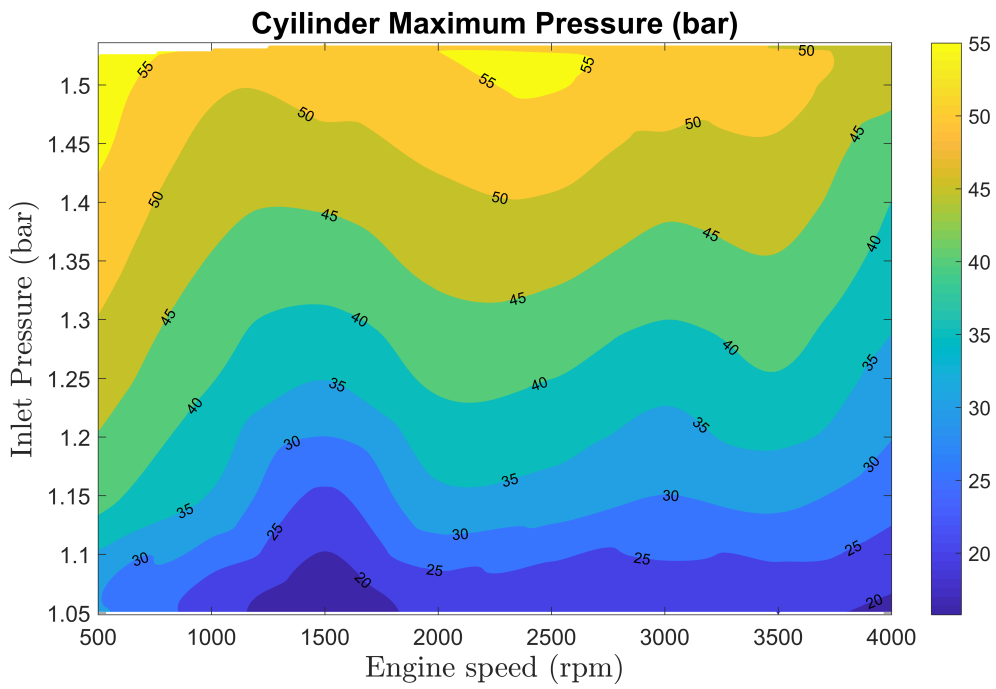
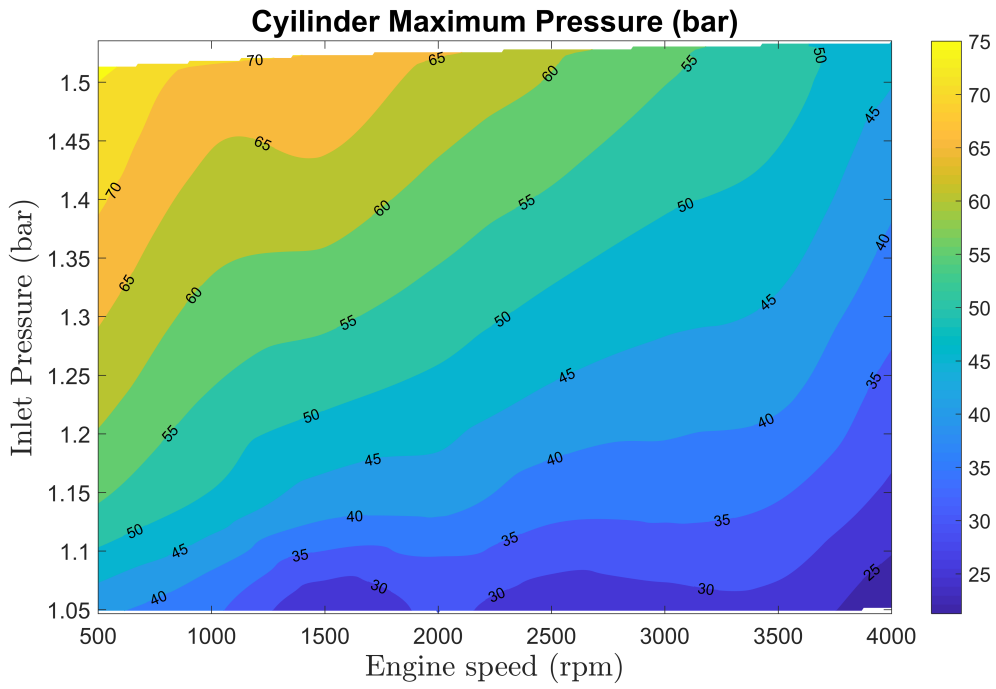
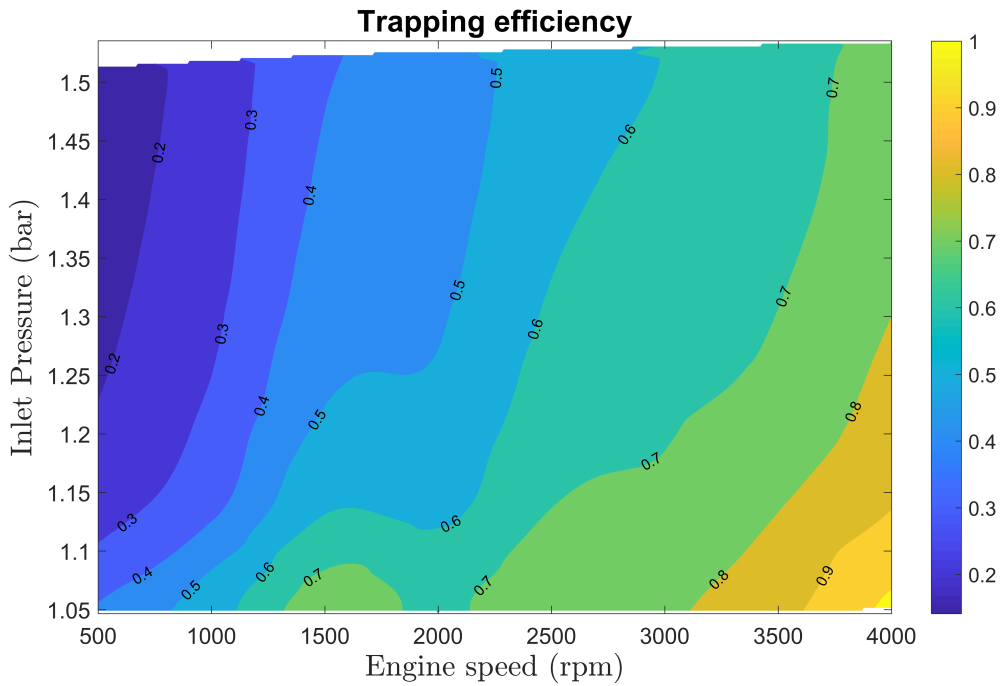
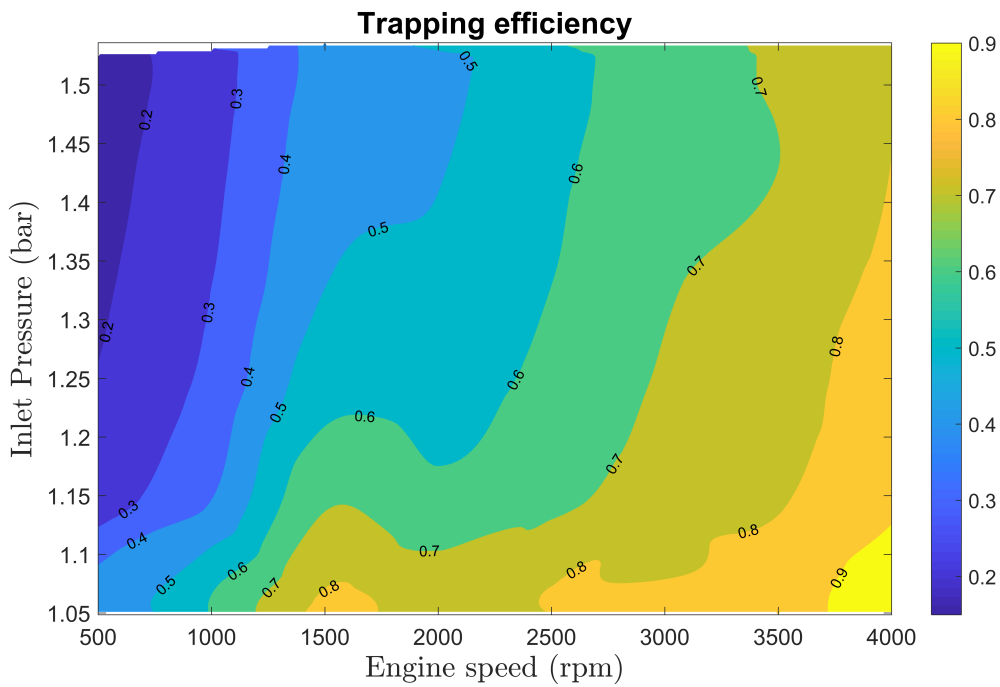


Figura 37: Presiones máximas en el interior del cilindro para distintas posiciones



(a) Posición 4



(b) Posición 12

Figura 38: Rendimiento de retención para distintas posiciones

La sobrealimentación genera una línea que divide de manera muy marcada una zona en la que las altas presiones presentan problemas y otra en la que son claramente beneficiosas para los resultados del motor. En la primera zona, para bajas revoluciones por minuto, las altas presiones elevan el consumo sin generar apenas un incremento en las prestaciones. Esto se debe a que el cortocircuito de mezcla fresca en un motor de 2 tiempos a bajas revoluciones por minuto, donde el cruce de válvulas tiene una mayor duración en tiempo (mismo ángulo girado a menor velocidad), lleva a que se pierda una gran parte del combustible introducido en los carburadores. En el motor 3S ICE ocurre de manera similar, puesto que los cilindros disponen de lumbreras, como en los motores de 2 tiempos, con un tiempo de cruce importante. Esto se ve representado en los coeficientes de renovación de carga, siendo el rendimiento de retención muy representativo (figura 38).

Al otro lado de esta división se encuentran las zonas de mayores velocidades de giro, donde aumentar la presión de admisión genera un importante incremento de las prestaciones (35, 34) con un consumo bajo respecto al resto del mapa de funcionamiento.

En resumen, en el caso de restringir el funcionamiento del motor a áreas donde sea realmente efectiva (mayores a 2000 rpm, entre 1.3 y 1.5 bar), la sobrealimentación parece una buena opción, especialmente considerando que el motor tiene como objetivo funcionar como un *range extender*, de manera que el motor solo funcionará en las zonas lejanas a los óptimos durante los transitorios de arranque/parada. Si se utiliza en el resto del rango de funcionamiento, la cantidad de combustible perdida durante el cortocircuito de mezcla crece sin aportar ventajas, de manera que la sobrealimentación en bajas velocidades de giro estaría descartada.

Con todo, los consumos de todo el mapa de funcionamiento del motor son elevados actualmente, lo cual parece indicar que sobrealimentar el motor en su versión con carburadores en lugar de inyectores no parece la solución definitiva. Además, la idea inicial del motor presenta un modelo con inyectores, de manera que uno de los estudios que se realizan a continuación es precisamente una comparativa entre una nueva versión con inyectores y la actual con carburadores.

Por otra parte, viendo las diferencias entre las posiciones se puede extraer otra conclusión, la posición del actuador afecta a los diversos parámetros de estudio. Afecta al rendimiento de retención, al consumo, a las prestaciones afecta incluso a las presiones y temperaturas dentro de la cámara (figuras 36 y 37)...

Esto da una idea fundamental para completar el estudio acerca de la sobrealimentación, a la vez que complementa el de la viabilidad como *range extender*. Mientras que los mapas ofrecen una información que puede ser positiva en ciertas zonas, si se completa el estudio con mapas que enfrentan la posición a la velocidad de giro del motor (ya que cambiar la posición del actuador durante el funcionamiento es una posibilidad real que ofrece el motor, siendo esta la novedad del mismo) se obtendrá una información muy valiosa.

| Casos | Posición | Velocidad de giro (rpm) |
|-------|----------|-------------------------|
| 1-10 | 0 | 500-4000 |
| 11-20 | 2 | 500-4000 |
| 21-30 | 4 | 500-4000 |
| 31-40 | 8 | 500-4000 |
| 41-50 | 12 | 500-4000 |
| 51-60 | 16 | 500-4000 |

Cuadro 12: Casos para el estudio Posición - Velocidad de giro. $P_{inlet} = 1,15bar$

Sin incluir esos mapas, la conclusión que parecen arrojar los mapas del estudio hasta el momento es que merece la pena sobrealimentar el motor, pero solo en ciertos puntos. Es posible observar mayores potencias en altos regímenes de giro con sobrepresiones y mayores valores de par obtenido para bajos regímenes de giro también con sobrepresiones, pero con los contrapuntos observados.

Pero, como se ha dicho, algunos valores varían entre posiciones. A continuación se analiza qué pasaría si, en vez de sobrealimentar el motor, se va alternando entre las distintas posiciones con una presión constante sin sobrealimentador.)

6.4. Estudio de las posiciones del actuador

Tal y como se introducía en el punto anterior, en este caso se estudia el comportamiento del motor a una presión constante de 1.15 bar en velocidades de giro de entre 500 y 4000 revoluciones por minuto para las distintas posiciones que presenta el motor. Se recuerda que estas posiciones determinan el desfase entre los émbolos de admisión y escape, generando un volumen de combustión y relación de compresión distintos para cada una.

Analizando los mapas de *Posición - Velocidad de giro* (figuras 43 a 41) obtenidos de sus respectivos casos (12), se puede obtener un nuevo enfoque.

Sobre las prestaciones del motor (figuras 39 a 41), es posible visualizar cómo los puntos de máxima potencia coinciden con los de mínimo consumo. Esto genera una buena zona de trabajo ya que, a pesar de que el par es mucho mayor en zonas de baja velocidad de giro y disminuye con el aumento de la misma y con las posiciones del actuador, el mapa presenta zonas de valores estables en situaciones similares a los focos de máxima potencia.

Las posiciones permiten variar la relación de compresión porque varía el volumen de la cámara varía. Estos cambios de volumen tienen repercusión directa en los coeficientes y rendimientos de llenado del cilindro, aunque la relación es más dependiente de la velocidad

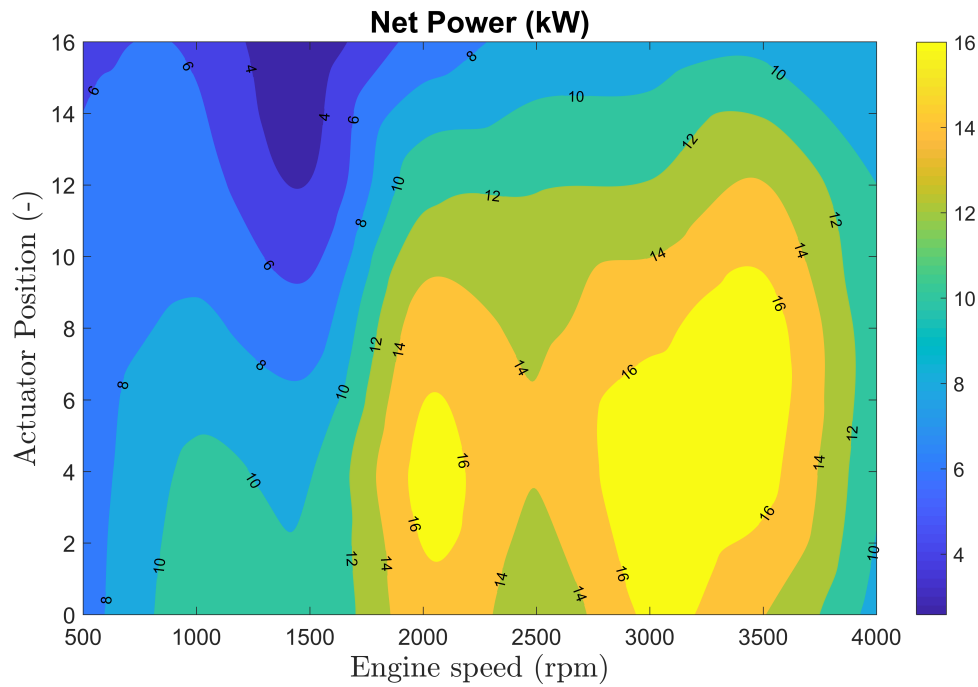


Figura 39: Potencia neta

de giro, pues afecta enormemente a los movimientos turbulentos que aparecen, mejorando o empeorando el llenado. La eficiencia de la renovación de la carga en su conjunto, y en qué rangos funciona mejor determina en gran medida las prestaciones del motor.

En los estudios realizados se ha considerado mucho el rendimiento de retención. Como se puede ver en la figura 43, el comportamiento es similar al descrito en el estudio de sobrealimentación. Mayor velocidad de giro implica menor tiempo de cruce en la apertura de las lumbreras, con lo que el gasto retenido aumenta frente al suministrado que permanece constante, aumentando así el rendimiento de retención. Además, para ciertas velocidades de giro, los cambios de volumen en la cámara pueden aportar mejoras a este rendimiento, especialmente entre 1500 y 2500 rpm. Se puede observar cómo el rendimiento de retención presenta sus valores más altos en zonas similares a las máximas prestaciones.

Además, a mayor velocidad de giro, mayor será la cantidad de gases quemados que no escapan, y puesto que la cámara tiene un volumen determinado, menor la mezcla fresca que se introduce, disminuyendo la eficiencia del barrido o *scavenge efficiency* y empeorando la combustión, lo cual produce menores prestaciones.

En cuanto a los coeficiente de carga, llenado y de admisión (figuras 44 y 45), hacen referencia a la masa retenida, a la atrapada y suministrada frente a la de referencia respectivamente (ver figura 29). El gasto másico de referencia se calcula de manera proporcional a la velocidad de giro, con lo cual a mayor velocidad de giro mayor será el divisor, dando lugar a un cocientes más bajos cuando la renovación de la carga no es óptima.

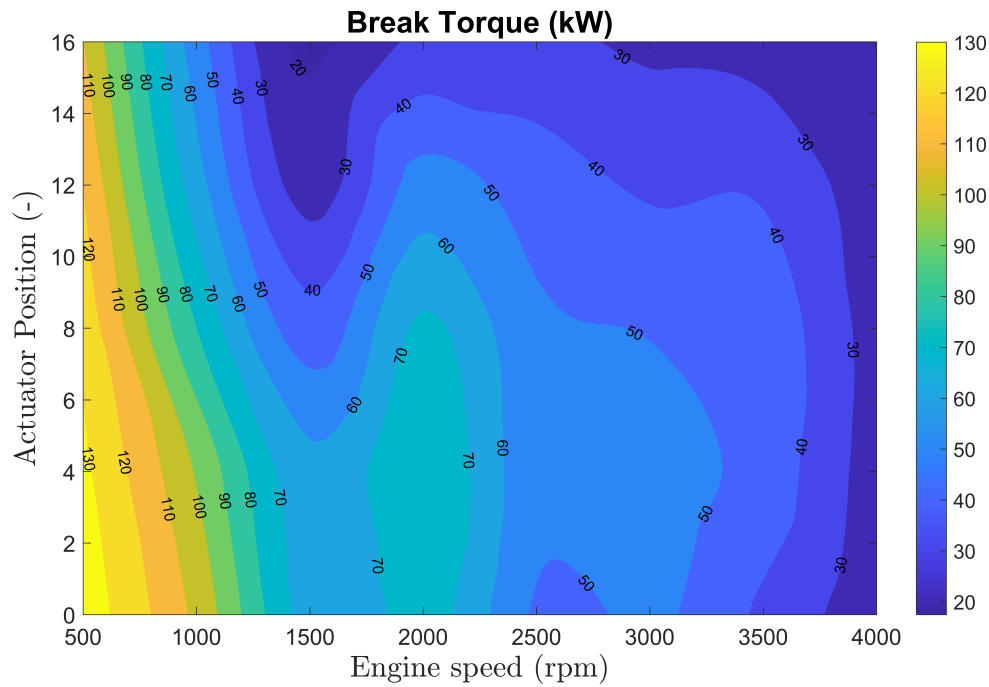


Figura 40: Par generado por el motor

Todos estos coeficientes presentan valores muy bajos a partir de 3500 rpm, lo que significa que el proceso de renovación de la carga empeora. Esto es, en parte, explicación de por qué disminuyen las prestaciones a partir de ese rango. El único que se mantiene alto es el rendimiento de retención.

El hecho de que la combustión sea peor en 4000 rpm se puede ver también en la figura 42, donde tanto las presiones como las temperaturas caen para las velocidades más altas. Las combustiones, cada vez más cortas, pueden implicar procesos incompletos que dan lugar a inquemados, reduciendo las prestaciones.

Estos resultados llevan a dos conclusiones:

- La primera, los resultados distan de los obtenidos mediante sobrealimentación. Esto indica que, suponiendo que se trabaja con carburadores, sobrealimentar el motor sería conveniente para optar a prestaciones mayores. Además, tanto en el estudio de sobrealimentación como en este se puede observar que se puede obtener un buen control de las prestaciones con las posiciones del actuador, por lo que combinar esto con la sobrealimentación sería beneficioso. Pero el consumo del motor sigue siendo elevado, por lo que es conveniente estudiar la inclusión de inyectores.
- La segunda, el motor presenta una zona de funcionamiento muy interesante para trabajar como *range extender*. Mediante el control de las posiciones del actuador y trabajando en la zona de 2000 rpm o en la de 3500 rpm se pueden conseguir buenas

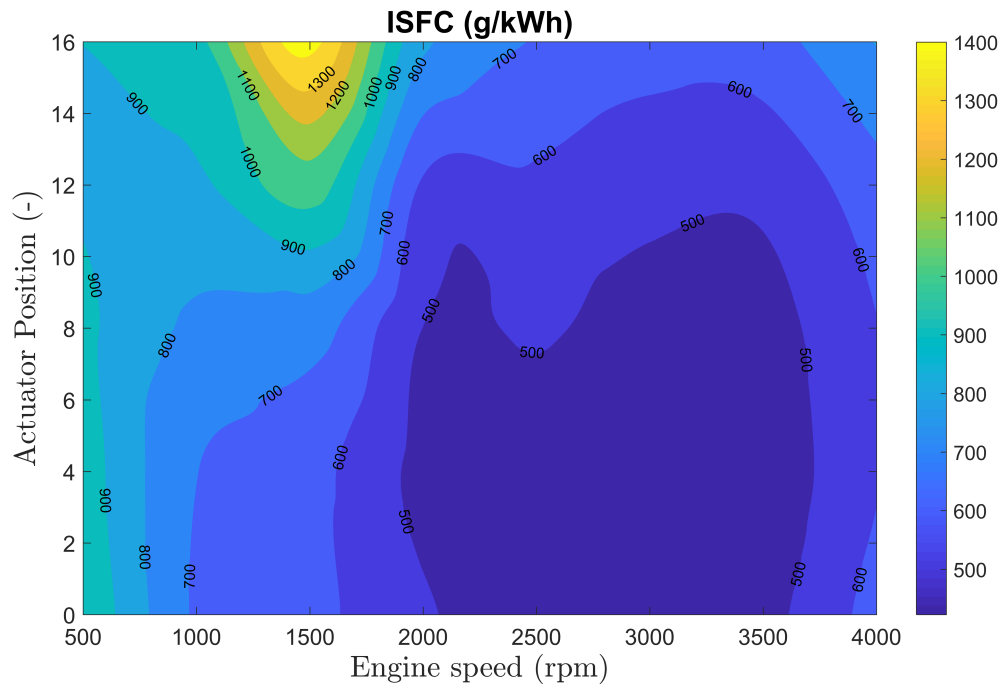


Figura 41: Consumo específico

prestaciones con el consumo mínimo que ofrece el motor y con la posibilidad de controlar estos parámetros mediante cambios entre posiciones, ya que el rango de valores acotado en la zona de trabajo mencionada permite variar las prestaciones obtenidas sin salirse de los óptimos de presión de admisión o de régimen de giro.

6.5. Estudio para la inclusión de inyección directa

En la explicación de los elementos del motor se incluía una bomba de inyección dentro de los cilindros. Sin embargo, en todos los estudios y en la explicación del modelo VEMOD del motor se ha dicho que se utilizaba inyección indirecta mediante carburadores previos a los cilindros. Esto se debe a que el prototipo que el fabricante ofreció al CMT para realizar los ensayos y estudios correspondientes estaba equipado con carburadores. Además, la herramienta VEMOD sigue en desarrollo y en ese momento carecía de la opción de utilizar inyectores funcionales.

Sin embargo, como en un motor de 2 tiempos, la ventana de tiempo en que las lumbreras de admisión y escape están abiertas a la vez es muy grande. Esto genera porcentajes de masa de cortocircuito importantes. La inyección indirecta conlleva pérdidas de combustible que suponen un coste económico y un impacto en las emisiones, pues la masa de cortocircuito es en parte mezcla fresca en lugar de solo aire y gases quemados.

Por ello, al finalizar los estudios con carburador se lleva a cabo un estudio con inyección (que se modela en VEMOD con un controlador a base de sensores una vez la opción está disponible) para visualizar los cambios en el comportamiento del motor frente a la versión con carburadores. Utilizando casos similares a los mostrados en el estudio de posición - velocidad de giro, se obtiene una comparación entre los resultados dados por la versión con carburador frente a la versión con inyectores.

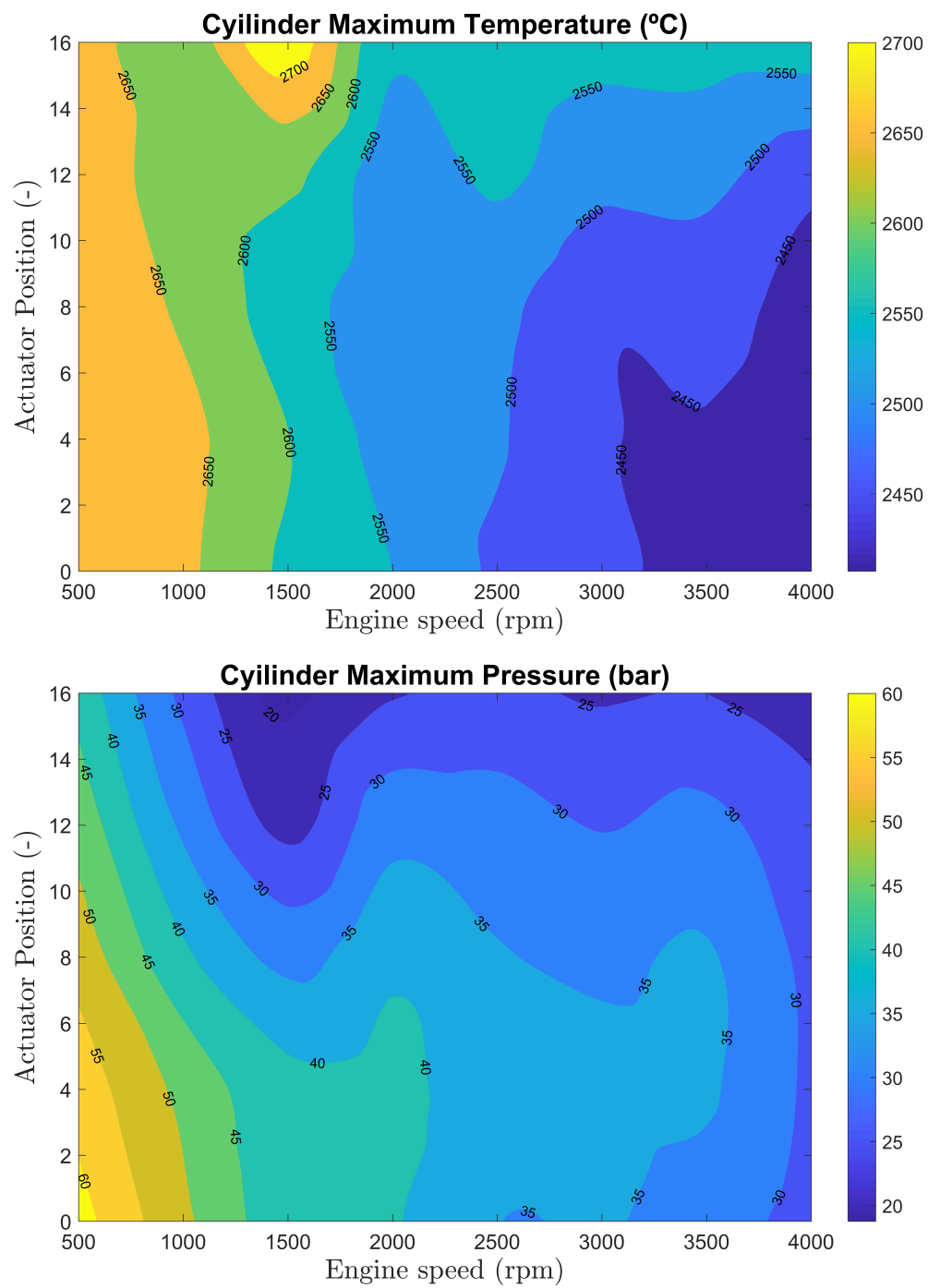


Figura 42: Condiciones en el cilindro

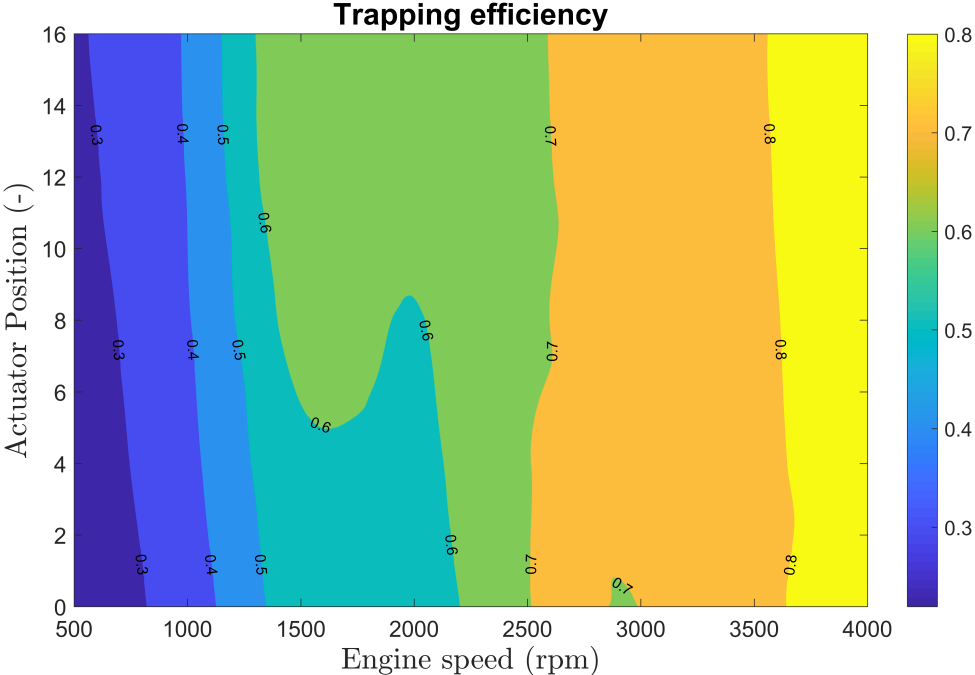


Figura 43: Rendimiento de retención

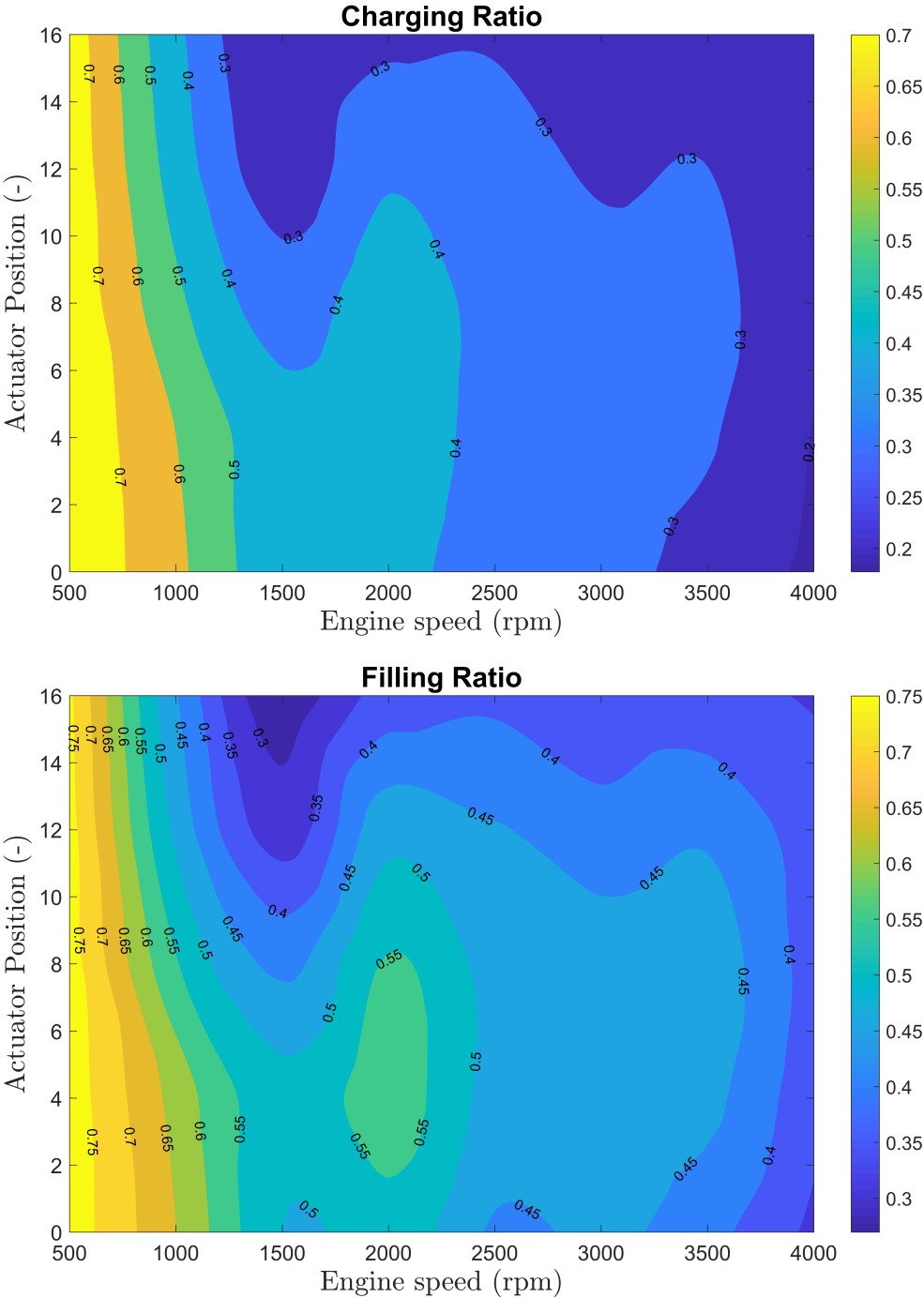


Figura 44: Distintos ratios representativos de la renovación de la carga (1)

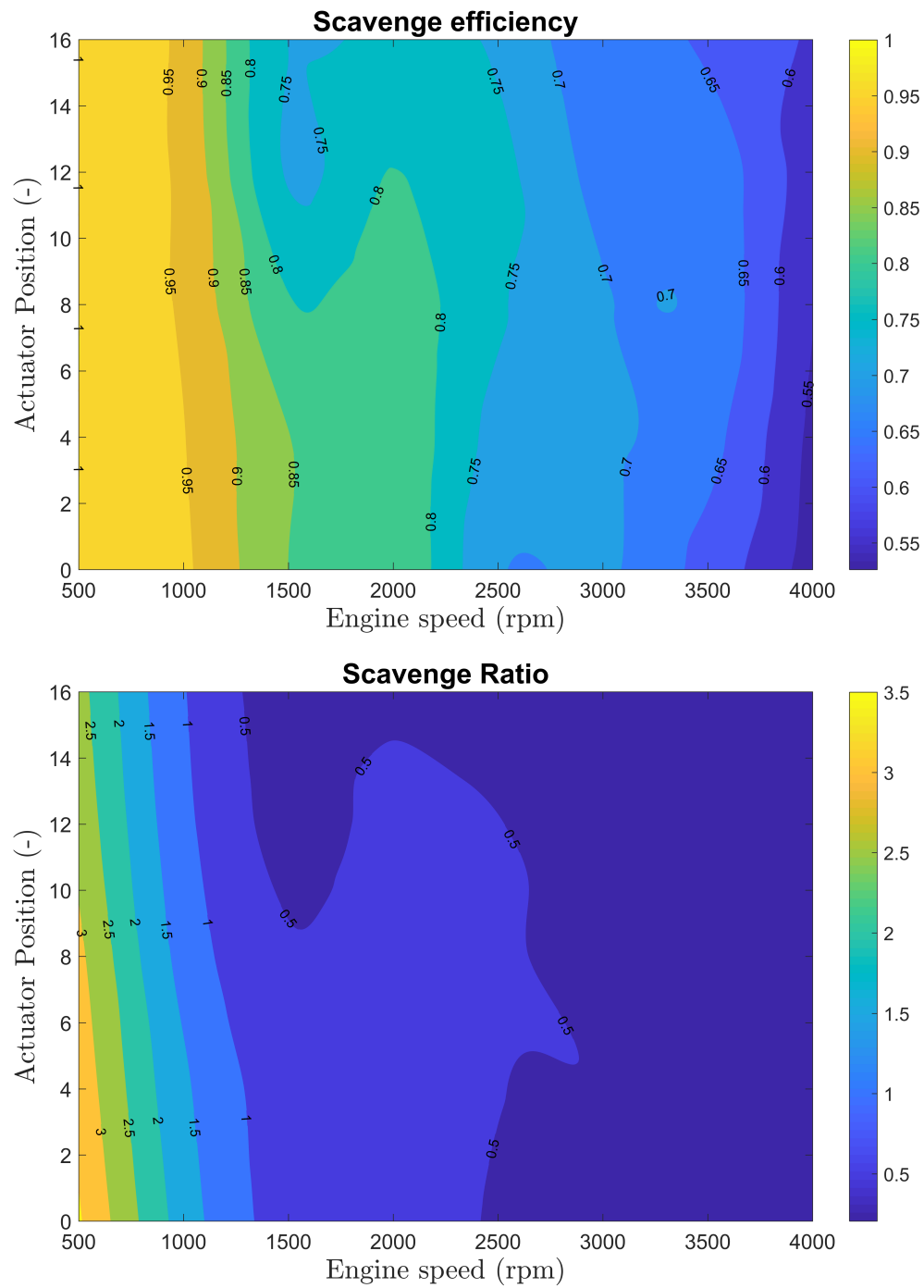
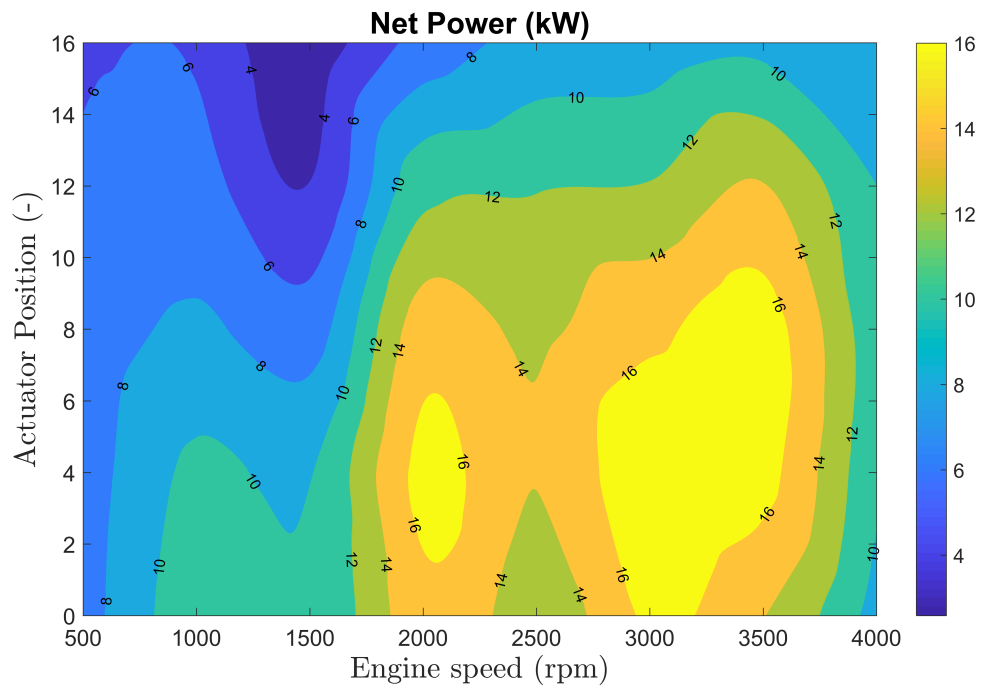
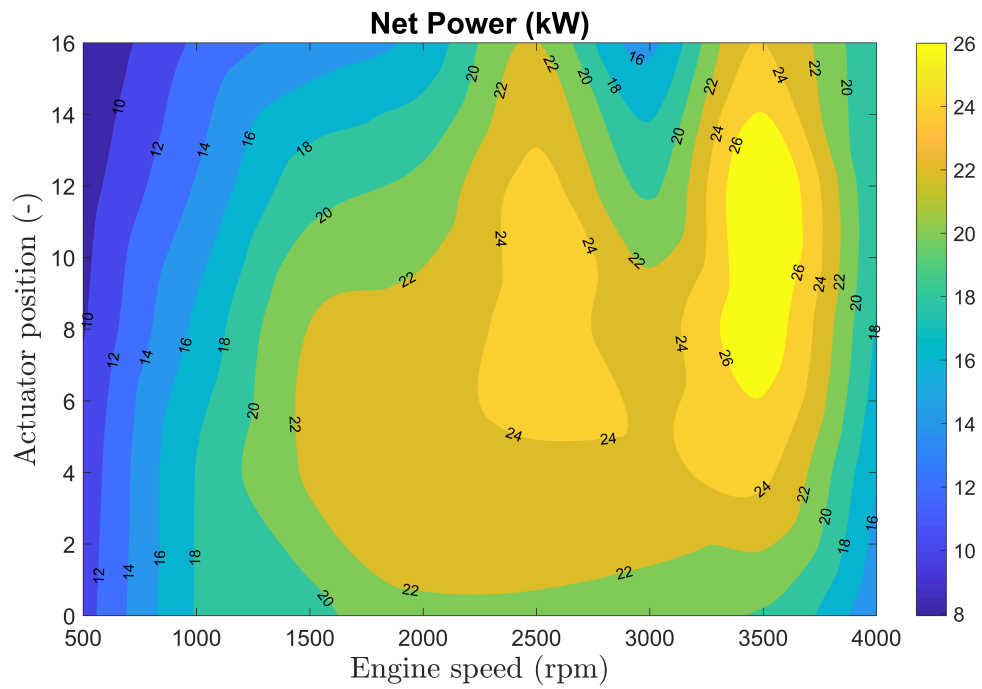


Figura 45: Distintos ratios representativos de la renovación de la carga (2)

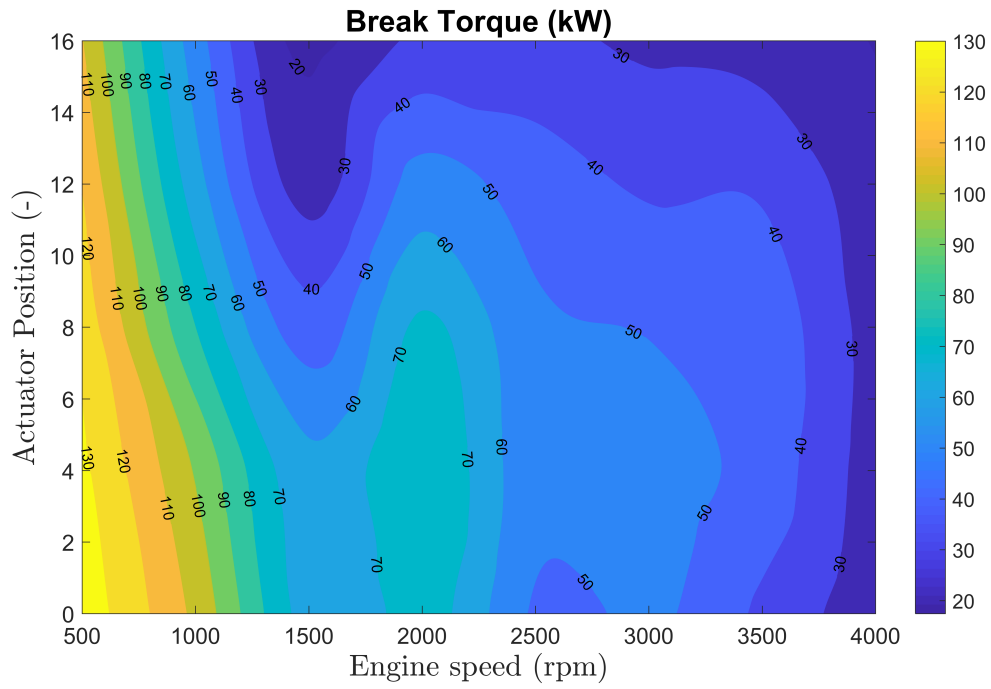


(a) Carburadores

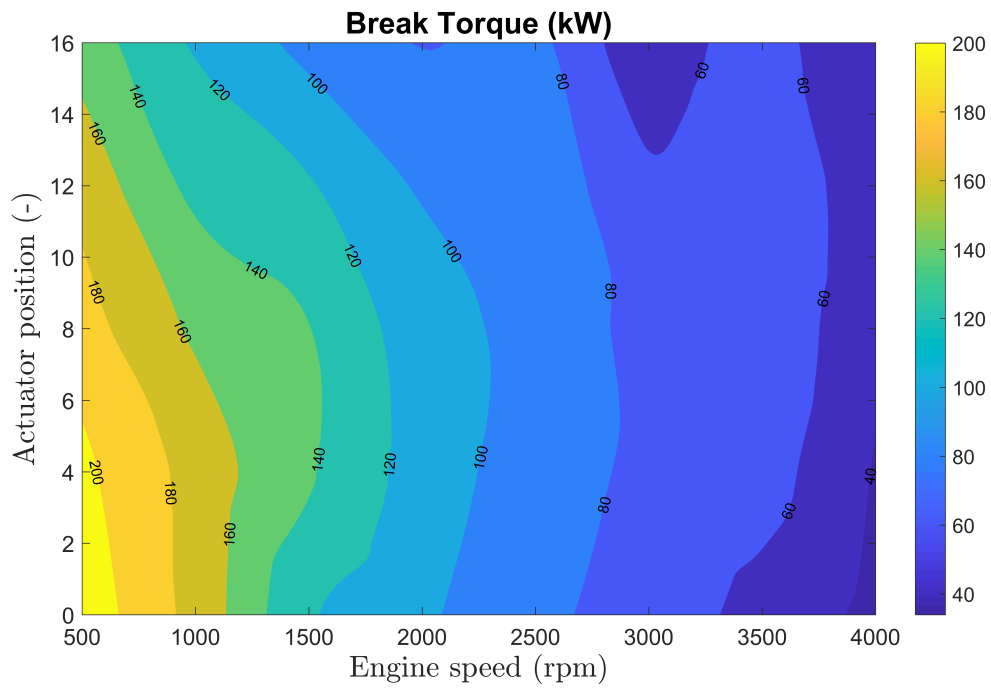


(b) Inyectores

Figura 46: Comparación de la potencia generada entre el motor con carburadores y con inyectores

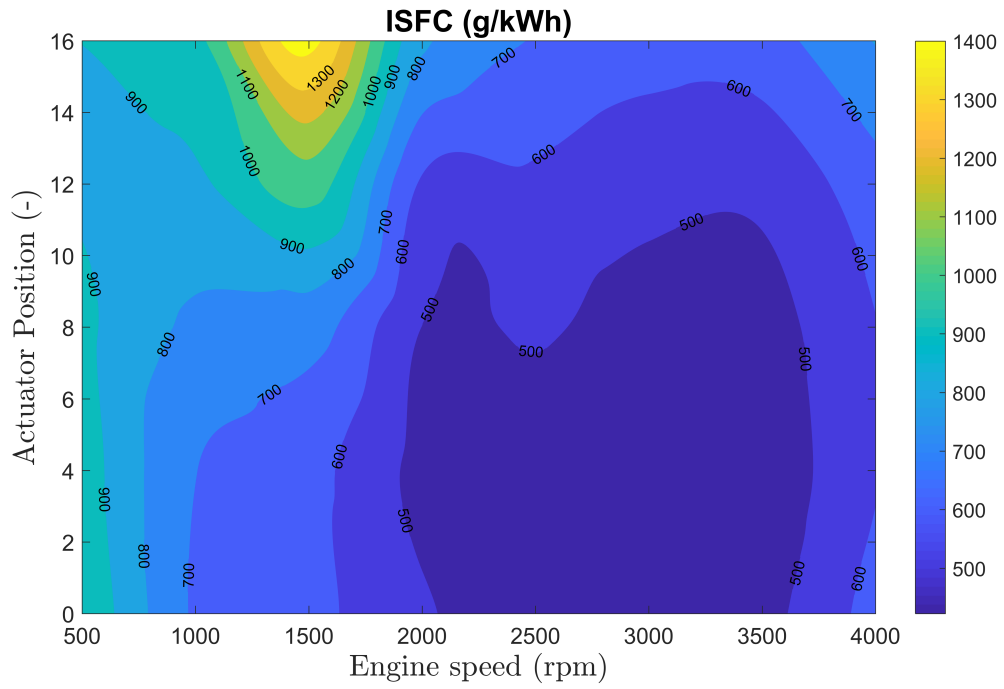


(a) Carburadores

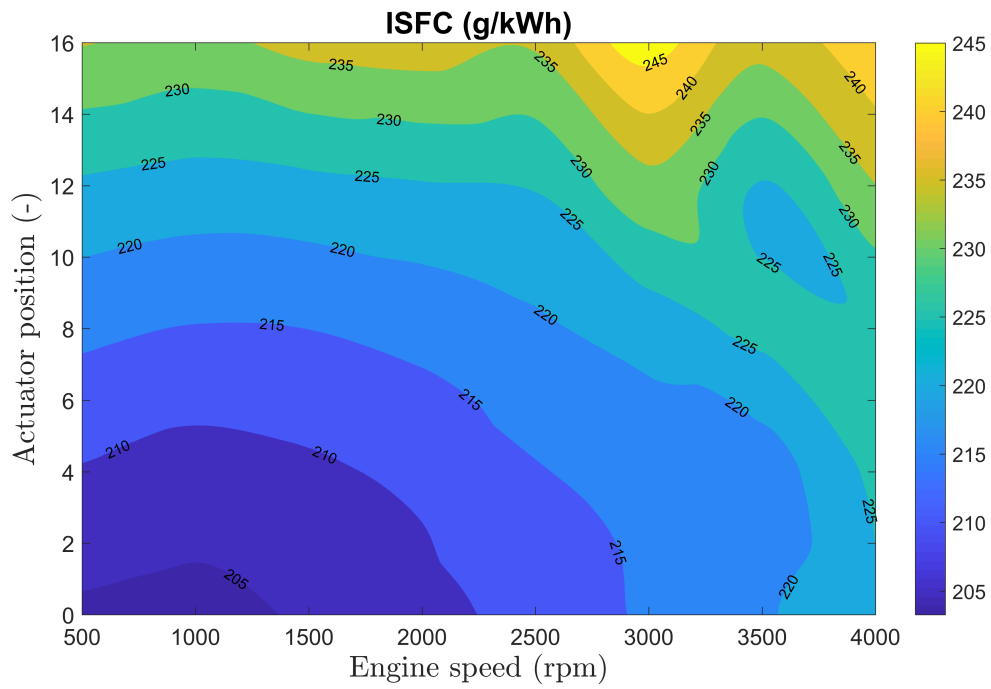


(b) Inyectores

Figura 47: Comparación del par generado entre el motor con carburadores y con inyectores

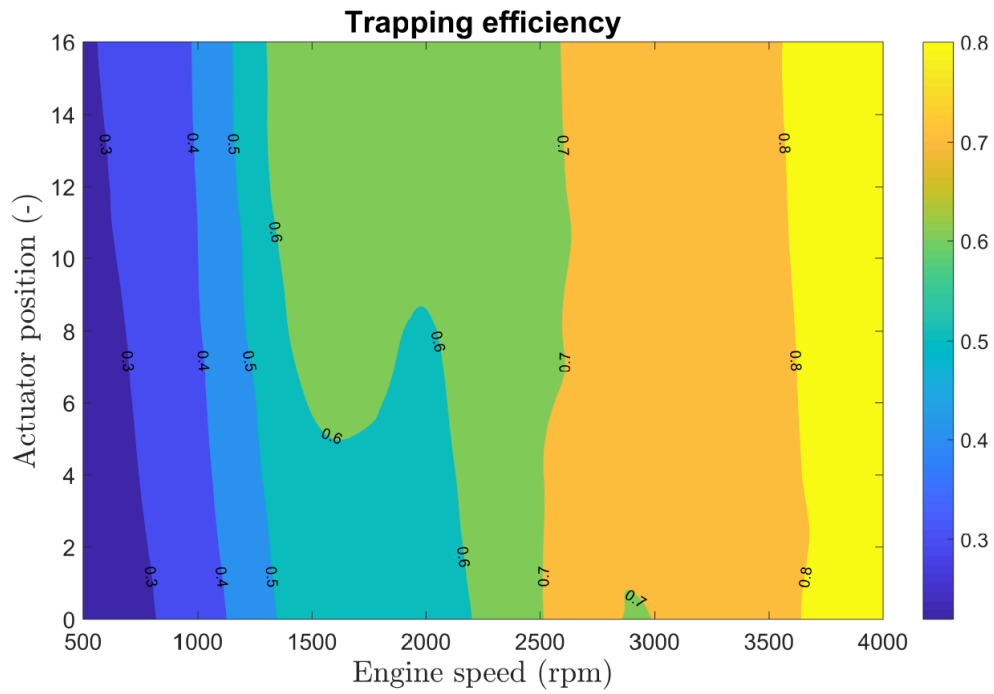


(a) Carburadores

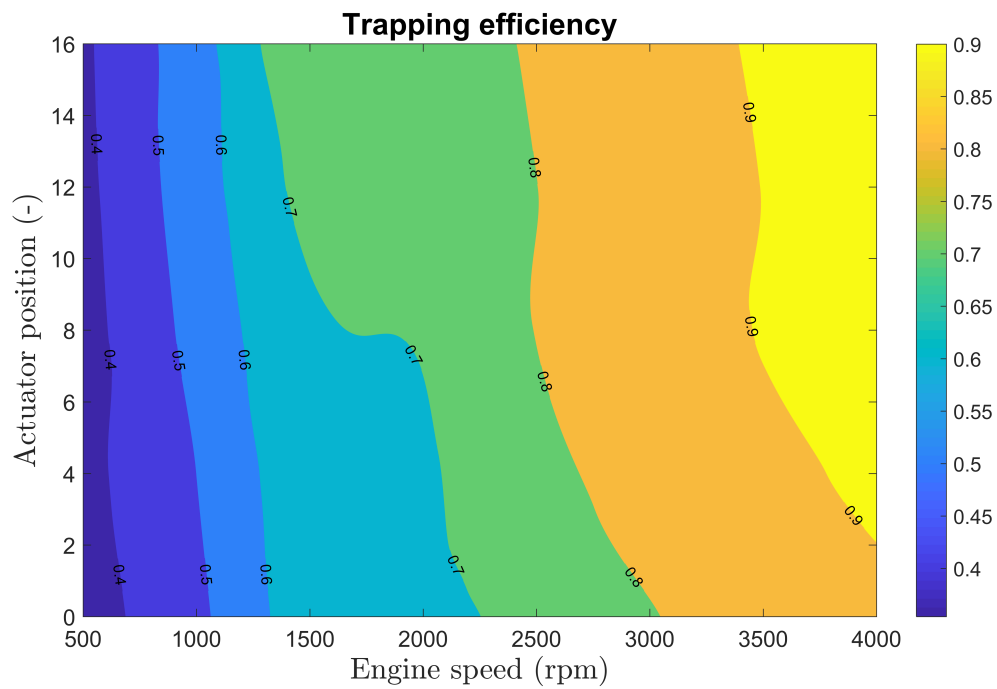


(b) Inyectores

Figura 48: Comparación del consumo específico del motor con carburadores y con inyectores



(a) Carburadores



(b) Inyectores

Figura 49: Comparación del rendimiento de retención entre el motor con carburadores y con inyectores

Si se observa la figura 46 se observa que los focos de máxima potencia permanecen en lugares similares (aunque en los inyectores se dan para posiciones más abiertas), presentando valores mayores el modelo con inyectores. La potencia máxima se conseguía con los carburadores en las zonas de velocidades de giro más altas porque, en parte, es donde menos combustible se pierde debido a la masa de cortocircuito en un motor que trabaja de manera similar a uno de 2 tiempos. Dado que los inyectores evitan que se pierda combustible durante el cruce de lumbreras, se genera un aumento de combustible disponible en el cilindro en el momento de la combustión. Este combustible permite desarrollar mayores prestaciones tales como el par y la potencia, con un consumo igual o inferior.

Esta explicación es aplicable, tal y como se ha dicho, a la comparación del par generado por cada versión del motor. Observando la figura 47, las tendencias de los mapas son similares, reduciéndose el par obtenido desde las posiciones más cerradas con bajas velocidades de giro (máximo par) hasta las más abiertas con velocidades de giro de unos 4000 rpm (mínimo par). Sin embargo, el mapa de inyección directa ofrece valores mayores, hasta un 100 % extra de par en las zonas mínimas y alrededor de un 30 % en los puntos de mayor par.

Respecto al consumo específico (figura 48), la respuesta es inmediata. La versión con inyectores ofrecen un consumo extremadamente inferior a la versión con carburadores, en todo el mapa. Mientras que el mapa de los carburadores asciende a consumos de 1400 g/kWh en algunos puntos y la zona de funcionamiento óptimo tiene una media de 500-600 g/kWh, el mapa de inyectores no sobrepasa un consumo de 245 g/kWh en ningún punto representado. Esto no solo supone una mejoría enorme respecto a los carburadores, sino que además la poca variabilidad del consumo (40g/kWh entre el mínimo y el máximo) permite trabajar en casi cualquier régimen y posición sin que el consumo sea un problema.

Por otra parte, en la figura 49, es posible apreciar la similitud en la forma del mapa de valores, aunque los valores no son los mismos. El rendimiento de retención se define de manera algo distinta en inyección directa e indirecta, pero la diferencia es apreciable, siendo el rendimiento alrededor de un 10 % mayor en todo el mapa en la versión del motor con inyección directa.

Teniendo en cuenta que el motor funcionará en zonas de óptimo funcionamiento dada su tarea de *range extender*, se comparan las prestaciones dadas por el motor en lo que podría dicha zona (alrededor de la posición 8 y 3200-3300 rpm sería un punto común). La potencia desarrollada por los inyectores supone un incremento aproximado del 60 % respecto a los carburadores, similar a la mejora obtenida en par en esa zona. El consumo en esta zona supone, en caso de usar carburadores, alrededor de un 240 % extra que en la conducción con inyectores.

El uso de inyectores en el motor significa una opción mejor en consumo y prestaciones en todo el mapa de funcionamiento, y ofrece unas ventajas en prestaciones más que notables para el punto de funcionamiento óptimo, además de una reducción considerable del consumo.

7. Conclusión

A lo largo del documento los distintos estudios han sido presentados, desarrollados y realizado una conclusión al respecto. Contando con ello, se repasan las conclusiones ofrecidas dando unión y cohesión a cada una de ellas, formando una idea de lo que, según los resultados arrojados por los estudios, debería ser el camino a seguir para el desarrollo del motor 3S ICE.

7.1. Conclusiones de los estudios

En primer lugar, tras analizar todos los mapas obtenidos del estudio del coeficiente de mezcla para modelar el comportamiento del barrido en la cámara de combustión (mezcla perfecta o barrido perfecto), se decidió utilizar el valor de 0.5 de entre un rango de 0 (barrido perfecto) y 1 (mezcla perfecta), obteniendo resultados que equivalen a un proceso intermedio. Esta decisión basa su juicio en el carácter predictivo del proyecto, ya que el motor se encuentra en desarrollo de los primeros prototipos y ciertas características podrían no ser finales, teniendo así unos resultados más flexibles.

En segundo lugar, el estudio realizado para comprobar la viabilidad de añadir un turbogrupo o derivados que permitan sobrealimentar la admisión no es del todo concluyente por sí mismo. Debido a la naturaleza del 3S ICE (utilizarse en un rango concreto de funcionamiento como *range extender*) podría decirse que dicha sobrealimentación sería beneficiosa del motor siempre y cuando sea utilizada únicamente en aquellas zonas del mapa de funcionamiento en que es realmente beneficiosa. Pero, dado que el motor está pensado para tener inyectores, disponiendo además de la posibilidad de cambiar entre posiciones para ajustar las prestaciones, la decisión final es que no se debe sobrealimentar la versión del motor con carburantes.

Siguiendo con los estudios presentes en el documento, se observa rápidamente que, como se ha adelantado, las posiciones del actuador influyen en los parámetros más representativos del funcionamiento del motor (par, potencia, consumo específico, etc.) y lo hacen de manera que tener un control de las posiciones permite controlar dichos parámetros con eficacia y, sobre todo, con sentido. No son un añadido fútil, sino que tienen una utilidad demostrada.

Por último, los resultados correspondientes a los estudios de la versión del motor con inyección directa son excelentes en comparación a los equivalentes en la versión con carburantes. Las prestaciones son mayores, en rangos de funcionamiento similares, no muy exigentes mecánicamente y con un consumo mucho menor (incluso inferior a la mitad en las zonas óptimas del consumo con carburadores). Es por tanto recomendable llevar a cabo los nuevos prototipos con la versión de inyección directa.

7.2. Uso como *Range Extender*

Tras revisar todos los resultados presentados en el documento y analizar las conclusiones que arrojan, se llega a las siguientes conclusiones:

El pequeño tamaño del motor es una cualidad indispensable para formar parte de un grupo motor híbrido. La sencillez propia de un motor de dos tiempos permite una opción económica, mientras que las innovaciones tecnológicas realizadas por los fabricantes como la división del ciclo en un tercer tiempo incluyendo la refrigeración, ofrecen altas prestaciones considerando las dos anteriores propiedades del motor.

Como resultado del desarrollo llevado a cabo por InnEngine, se ha obtenido un motor compacto, sencillo y económico gracias a que las tecnologías VPT y VCR, unidas a las levas en forma de disco, permiten sustituir los árboles de levas, cigüeñales, etc. Estos mismos sistemas además, le confieren excelentes prestaciones, sobre todo en rangos concretos de funcionamiento, permitiendo que el motor 3S ICE de InnEngine sea un gran candidato para su uso como un *range extender* en un grupo híbrido formado por un motor eléctrico y el motor 3S ICE.

7.3. Futuros proyectos

El motor se encuentra en fases de desarrollo aún tempranas. Se está construyendo ahora mismo la versión del motor con los inyectores, lo que permitirá ajustar el modelo a los resultados reales que ofrezcan los ensayos con el mismo. Los nuevos resultados, unidos a los obtenidos de la versión actual con carburadores, permiten realizar nuevos estudios.

Entre las distintas oportunidades, una interesante sería comparar la masa de combustible que escapa sin quemar de los cilindros, tanto de la que escapa durante el cruce de las lumbreras como la masa inquemada tras la combustión. Se espera que el modelo con inyectores reduzca en gran medida esta masa, pero sin herramientas algo más potentes como un CFD, elaborado con el conocimiento de ambas versiones del motor, es difícil obtener unos resultados aceptables.

Otro de los objetivos a corto plazo sería obtener un estudio de sobrealimentación del motor similar al ya realizado pero con la versión de inyectores. El estudio con los carburadores arroja resultados que mejoran en mucho (incluso un 80-90% en algunos puntos de funcionamiento) las prestaciones del motor, y la comparación de inyectores frente a carburadores es también positiva, mejorando prestaciones y consumo. De esta manera, es de esperar que la sobrealimentación funcione aún mejor con en el 3S ICE con inyectores.

8. Presupuesto

En esta sección del documento se realiza una estimación de los costes económicos asociados a las actividades que se han llevado a cabo durante el desarrollo de este proyecto. Las distintas actividades se pueden separar según la naturaleza de las mismas. En primer lugar se realizaron diversas pruebas del prototipo en un banco de ensayos. Posteriormente, se desarrolla la interfaz gráfica en VEMOD con el modelo asociado el motor y, finalmente, se llevan a cabo los estudios con las conclusiones pertinentes utilizando la herramienta mencionada.

8.1. Actividades realizadas

Se lista un resumen de todas las actividades realizadas agrupadas según las categorías mencionadas: ensayos en el banco, desarrollo de la herramienta y realización y análisis de los estudios.

8.1.1. Ensayos experimentales

Para realizar de manera correcta los ensayos con el prototipo se deben realizar diversas tareas, las cuales han de llevarse a cabo por especialistas o gente formada para ello. Las actividades relacionadas con los ensayos se realizaron de manera previa al inicio del proyecto que da nombre al documento, pero se incluye dado que es esencial para el desarrollo del mismo. Sin estos datos el modelo no podría ser validado.

Actividad 1: Montaje de bancos y habilitación de salas. En primer lugar, se debe habilitar una sala, consiguiendo las condiciones necesarias para el ensayo en la misma. En el caso de este proyecto se hizo uso del banco de motor. En esta actividad se incluye:

- Limpieza y preparación de la sala.
- Instalación de los equipos correspondientes al ensayo.
- Calibración de sistemas.
- Instauración de los protocolos de trabajo y seguridad pertinentes.

Todas estas tareas se llevaron a cabo en un tiempo total de 5 días laborables, tratando

de tener a punto la sala y el banco lo antes posible sin salirse de los márgenes de seguridad y los protocolos establecidos.

Actividad 2: Ensayos con el motor. Se incluyen en esta actividad todas las tareas relacionadas con el uso de las instalaciones.

- Puesta en marcha
- Preparación y estabilización del banco.
- Comprobación de todos los sistemas.
- Ejecución de las rutinas de ensayo diseñadas para el motor
- Enfriamiento y parada del banco.
- Salida de datos y posibles modificaciones.

Los ensayos con el motor se realizaron en 10 días laborables, durante los cuales los primeros 5 se utilizaron para comprobar que todos los sistemas del motor funcionaban correctamente, y durante los 5 días posteriores se obtuvieron medidas geométricas, de temperaturas, de presiones y de las distintas prestaciones de interés, tales como consumo, par y potencia.

Actividad 3: Desmontaje de las instalaciones. Una vez acabados los ensayos se ha de despejar la o las salas utilizadas con el objetivo de disponer de la misma para aplicaciones futuras. Esto ha de realizarse con la mayor brevedad posible para no intervenir en otros proyectos del centro.

El banco de motor fue desmontado y la sala preparada en unos 4 días laborables, teniendo en cuenta diversas tareas de limpieza.

8.1.2. Desarrollo de código e interfaz y realización de los estudios

Una vez conseguidos los datos necesarios del motor prestado por el fabricante, se lleva a cabo el trabajo de generar modelos virtuales que permitan obtener nuevos datos cercanos al comportamiento real del motor en puntos que no se han podido ensayar, pudiendo caracterizar el mismo sin necesidad de un banco de ensayos.

Actividad 4: Diseño del primer modelo en XML. Cuando se obtuvieron todos los datos, se realizó el primer modelo en C++ por el departamento. Para ello, se siguieron las siguientes pautas:

- Modelado de las geometrías
- Recolección de información sobre posibles modelos para el motor.
- Modelado de los sistemas de barrido, combustión, etc.
- Planificación de casos.
- Análisis de los primeros resultados.

El tiempo estimado para el desarrollo del primer modelo se estima en unos 10 días laborables. En base a este primer modelo se inicia el proyecto presentado en el documento.

Actividad 5: Puesta a punto del modelo del motor en la interfaz gráfica. Esta actividad es la primera realizada por el alumno y es la que inicia las llevadas a cabo durante el desarrollo del proyecto presentado en este documento. Durante la misma, bajo la tutela de los responsables del proyecto, el alumno se encarga de configurar correctamente a través de la interfaz de VEMOD el modelo del 3S ICE, a través de los siguientes pasos:

- Revisión bibliográfica del motor y los modelos.
- Formación básica en el uso de C++.
- Estudio del primer modelo.
- Correcciones diversas de geometría y modelos.
- Desarrollo de una herramienta de procesado de datos mediante MATLAB.
- Validación del modelo.

Esta tarea supone el grueso del proyecto, con un tiempo total de 10 semanas, con al menos 5 días de actividad por semana.

Actividad 6: Realización de estudios. Una vez a punto el modelo, se llevan a cabo diversos estudios de distinta naturaleza. Mientras que algunos de ellos son demandados por el fabricante, como el estudio de sobrealimentación de la admisión, otros se realizan para caracterizar el motor y dar posibles soluciones a problemas e incluso posibles pasos futuros. Así, el proceso seguido viene dado por:

- El análisis del motor lleva a la elección de un nuevo estudio.

- Preparación del estudio mediante la selección de los puntos de funcionamiento pertinentes.
- Realización de los cálculos.
- Post-tratamiento de los resultados.

Para esta actividad se estima un tiempo de aproximadamente 4 semanas de al menos 5 días de actividad.

8.1.3. Análisis, tratamiento y redacción de los resultados y la información

Actividad 7: Conclusiones y redacción. Tras la obtención de los resultados se llevaron a cabo diversos análisis junto con el pos-tratamiento de los mismos, obteniendo conclusiones incluidas en este documento. En esta actividad se incluye:

- Análisis y discusión de los resultados.
- Recopilación de información extra para complementar los estudios.
- Redacción del presente documento.

El tiempo utilizado para esta última actividad se valora en 3 semanas.

8.2. Costes unitarios

Las tareas presentes en las actividades utilizan diversos recursos, teniendo cada uno sus propios costes. Estos se pueden caracterizar en función de la naturaleza de los mismos:

- Costes de amortización por infraestructuras y equipos.
- Costes de operación o funcionamiento.
- Costes de recursos humanos.
- Costes de licencias.

- .

Se adjunta un despliegue de los costes unitarios por hora correspondientes a los costes mencionados.

8.2.1. Infraestructura y equipos

Para los equipos utilizados se va a tener en cuenta su amortización, así como para el equipamiento específico. Por un lado se encuentra la sala utilizada del centro para realizar los ensayos, así como el propio banco. Según los cálculos internos del centro, el banco de motor con los diferentes sistemas, elementos instalados y los equipos informáticos de esta sala, el coste ascendería a unos 13€/h.

Se han de tener en cuenta también el coste del ordenador utilizado para el desarrollo y uso del modelo perteneciente al CMT de unos 800 €y del ordenador personal portátil del alumno (1100 €). Para calcular las amortizaciones de los equipos se utiliza la ecuación 6,

$$a = \frac{V_C - V_R}{n_a} \quad (6)$$

Donde:

- a es la amortización o depreciación, valorada en €/año.
- V_C es el valor de compra, en €.
- V_R es el valor residual del equipo, también en €.
- n_a es el período de amortización, indicado en años.

A partir de este valor se puede definir la tasa horaria (t_h) como la amortización entre las horas de trabajo al año, quedando las unidades en €/h. Suponiendo un valor residual del 20% de los valores de compra, y teniendo las horas de uso al año (35 h/semana, 46 semanas/año laborables implican un total de 1575 horas al año), los costes unitarios de los equipos serían:

- Ordenador del CMT

$$a = \frac{V_C - V_R}{n_a} = \frac{800 - 160}{8} = 80\text{€/año} \quad (7)$$

$$t_h = \frac{a}{h} = \frac{80}{1575} = 0,1016\text{€/h} \quad (8)$$

Debido a la tasa obtenida, la tasa horaria del ordenador perteneciente al CMT está de hecho incluida en la tasa que el centro ofrece sobre los costes de infraestructura y equipos.

- Ordenador portátil personal

$$(9) \quad a = \frac{V_C - V_R}{n_a} = \frac{1100 - 220}{3} = 293,33\text{€/año}$$

$$t_h = \frac{a}{h} = \frac{293,33}{1575} = 0,1862\text{€/h} \quad (10)$$

8.3. Licencias

En cuanto a las licencias, se incluyen los programas utilizados y sus tasas horarias.

- Office 360TM Un año de licencia tiene un coste de 69 €, con lo cual:

$$t_h = \frac{69}{1575} = 0,0483\text{€/h} \quad (11)$$

- MATLABTM Su licencia anual supone 800 €.

$$t_h = \frac{800}{1575} = 0,5079\text{€/h} \quad (12)$$

- VEMOD El software VEMOD no ha supuesto un coste para este trabajo puesto que el propio centro ha desarrollado la aplicación, de manera que ha sido cedida de forma gratuita para el personal envuelto en el desarrollo del proyecto.
- TeXstudio 2.12.16 El software de TeXstudio es gratuito.

8.3.1. Costes indirectos

Al realizar cualquier actividad en un centro de investigación surgen necesidades varias básicas, como pueden ser la necesidad de luz y electricidad, entre otras. Según el CMT, estos costes ascienden aproximadamente al 10 % del presupuesto.

8.3.2. Recursos humanos

Para los costes humanos se tiene en cuenta la mano de obra usada en este proyecto. Los implicados responden a los siguientes cargos:

- Técnico de sala, con un coste por hora de 25 €/hora.
- Supervisor de sala, 40 €/hora.
- Director del proyecto (Doctor en Ingeniería Mecánica), 65€/h.
- Subdirector del proyecto (cursando un Doctorado en Ingeniería Mecánica), 40 €/h.
- Ingeniero en prácticas (Alumno encargado del proyecto y su redacción), 20 €/h.

8.4. Cálculo de los presupuestos

Se van a realizar los cálculos para el presupuesto por actividades, para luego calcular el total. En primer lugar, el cálculo por actividades.

8.4.1. Presupuesto por actividad

- **Actividad 1 - 40 horas**

| Descripción | Consumo (h) | Coste unitario (€/h) | Importe (€) |
|---------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Técnico de sala | 40 | 25 | 1000,00 |
| Supervisor de sala | 40 | 40 | 1600,00 |
| Infraestructura y equipos | 40 | 13 | 520,00 |
| | | Total | 3120,00 |

Cuadro 13: Presupuesto de la actividad 1 - Montaje de la sala.

■ **Actividad 2 - 80 horas**

| Descripción | Consumo (h) | Coste unitario (€/h) | Importe (€) |
|---------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Técnico de sala | 80 | 25 | 2000,00 |
| Subdirector del proyecto | 80 | 40 | 3200,00 |
| Infraestructura y equipos | 80 | 13 | 1040,00 |
| | | Total | 6240,00 |

Cuadro 14: Presupuesto de la actividad 2 - Ensayos experimentales.

■ **Actividad 3 - 32 horas**

| Descripción | Consumo (h) | Coste unitario (€/h) | Importe (€) |
|---------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Técnico de sala | 32 | 25 | 800,00 |
| Supervisor de sala | 32 | 40 | 1280,00 |
| Infraestructura y equipos | 32 | 13 | 416,00 |
| | | Total | 2496,00 |

Cuadro 15: Presupuesto de la actividad 3 - Desmontaje de la sala.

■ **Actividad 4 - 80 horas**

| Descripción | Consumo (h) | Coste unitario (€/h) | Importe (€) |
|---------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Director del proyecto | 25 | 65 | 1625,00 |
| Subdirector del proyecto | 80 | 40 | 3200,00 |
| Infraestructura y equipos | 80 | 13 | 1040,00 |
| | | Total | 5825,00 |

Cuadro 16: Presupuesto de la actividad 4 - Principios del modelo.

■ **Actividad 5 - 350 horas**

| Descripción | Consumo (h) | Coste unitario (€/h) | Importe (€) |
|---------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Director del proyecto | 50 | 65 | 3250,00 |
| Subdirector del proyecto | 150 | 40 | 6000,00 |
| Ingeniero en prácticas | 350 | 20 | 7000,00 |
| Equipo personal | 350 | 0,1862 | 65,17 |
| Infraestructura y equipos | 150 | 13 | 1950,00 |
| | | Total | 18265,17 |

Cuadro 17: Presupuesto de la actividad 5 - Ajuste del modelo.

■ **Actividad 6 - 140 horas**

| Descripción | Consumo (h) | Coste unitario (€/h) | Importe (€) |
|---------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Director del proyecto | 20 | 65 | 1300,00 |
| Subdirector del proyecto | 40 | 40 | 1600,00 |
| Ingeniero en prácticas | 140 | 20 | 2800,00 |
| Equipo personal | 140 | 0,1862 | 26,07 |
| Infraestructura y equipos | 40 | 13 | 520,00 |
| | | Total | 6046,07 |

Cuadro 18: Presupuesto de la actividad 6 - Cálculo de los estudios.

■ Actividad 7 - 100 horas

| Descripción | Consumo (h) | Coste unitario (€/h) | Importe (€) |
|---------------------------|-------------|----------------------|-------------|
| Director del proyecto | 25 | 65 | 1625,00 |
| Subdirector del proyecto | 40 | 40 | 1600,00 |
| Ingeniero en prácticas | 100 | 20 | 2000,00 |
| Equipo personal | 100 | 0,1862 | 18,62 |
| Infraestructura y equipos | 40 | 13 | 520,00 |
| | | Total | 5763,62 |

Cuadro 19: Presupuesto de la actividad 7 - Conclusiones y desarrollo.

■ Licencias

| Descripción | Consumo (h) | Coste unitario (€/h) | Importe (€) |
|-------------|-------------|----------------------|-------------|
| MATLAB | 180 | 0,5079 | 91,22 |
| Office 360 | 60 | 0,0483 | 2,98 |
| | | Total | 94,20 |

Cuadro 20: Presupuesto de las licencias

8.4.2. Presupuesto total

Uniando los presupuestos de todas las actividades al coste de las licencias y la base imponible IVA se obtiene el presupuesto global.

| Descripción | Importe (€) |
|--------------|-------------|
| Actividad 1 | 3120,00 |
| Actividad 2 | 6240,00 |
| Actividad 3 | 2496,00 |
| Actividad 4 | 5825,00 |
| Actividad 5 | 18265,17 |
| Actividad 6 | 6046,07 |
| Actividad 7 | 5763,62 |
| Licencias | 94,20 |
| Total costes | 47850,06 |

Cuadro 21: Importe bruto

| Descripción | Importe (€) |
|------------------------|-----------------|
| Total costes directos | 47850,06 |
| 10 % Costes indirectos | 4785,01 |
| Base imponible IVA | 52635,07 |
| 21 % IVA | 11053,36 |
| Total | 63088,43 |

Cuadro 22: Presupuesto total

Por tanto, el presupuesto total del proyecto asciende a:

SESENTA Y TRES MIL OCHENTA Y OCHO EUROS CON CUARENTA Y TRES CÉNTIMOS.

Referencias

- [1] Naciones Unidas. *Publicaciones principales. Programa 21*. 1992.
- [2] Oscar van Vliet, Anne Brouwer Sjoerd, Kuromachi Takeshi, Machteld van den Broek, and André Faaij. Energy use, cost and co2 emissions of electric cars. *Journal of Power Sources*, 2011.
- [3] Siang Fui Tie and Chee Wei Tan. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2013.
- [4] Apling Rusell and William S. Epling. Diesel oxidation catalyst. *Catalyst Reviews*, 20.
- [5] John S. Howitt and Max R. Montierth. Cellular ceramic diesel particulate filter. *SAE Transactions*, 1981.
- [6] J. Martin, F. Arnau, P. Piqueras, and A. Auñon. Development of an integrated virtual engine model to simulate new standard testing cycles. *SAE International*, 2018.
- [7] S.K. Godunov. A difference scheme for numerical solution of discontinuous solution of hydrodynamic equations. *Matematicheskii Sbornik*, 1959.
- [8] B. van Leer. Towards the ultimate conservation difference scheme, v.a second order sequel to godunov's method. *Journal of Computational Physics* 32, 1979.
- [9] J. Jean Arrègle, J. López, J. Martín, and E.M. Mocholí. Development of a mixing and combustion zero- dimensional model for diesel engines. *SAE Technical*, 2006.
- [10] Yeliana, C. Cooney, J. Worm, D. Michaelek, and J. Naber. Wiebe function parameter determination for mass fraction burn calculation in an ethanol-gasoline fuelled engine. *Journal of KONES Powertrain and Transport* 15, 2008.
- [11] J. Torregrosa, P. Olmeda, B. Degraeuwe, and M. Reyes. A concise wall temperature model for di diesel engines". *Applied Thermal Engineering* 26, 2006.
- [12] A.J. Torregrosa, A. Broatch, P. Olmeda, and C. Romero. Contribution to film coefficient estimation in piston cooling galleries. *Experimental Thermal and Fluid Science* 34(2), 2010.
- [13] F. Payri, P. Olmeda, J. Martín, and R. Carreño. A new tool to perform global energy balances in di diesel engines. *SAE Int. J. Engines* 7, 2014.
- [14] J. Benajes, P. Olmeda, J. Martín, and R. Carreño. A new methodology for uncertainties characterization in combustion diagnosis and thermodynamic modelling. *In Applied Thermal Engineering* 71, 2014.
- [15] F. Climent, Héctor and Payri and J. M^a. Desantes. *Modelado unidimensional de los motores de dos tiempos de pequeña calibrada*. Editorial Reverté S.A., 2004.

Parte II

Anexos

A. Anexo

A.1. Valores invariables

A.1.1. Valores de desfase para cada posición de actuador

| Posición | Apertura escape (rad) | Desfase pistón escape (rad) |
|----------|-----------------------|-----------------------------|
| 0 | 0.990 | 0.000 |
| 2 | 0.962 | -0.028 |
| 4 | 0.934 | -0.056 |
| 8 | 0.878 | -0.112 |
| 12 | 0.822 | -0.138 |
| 16 | 0.766 | -0.223 |

Cuadro A.1: Desfases aplicados por el actuador según la posición

A.1.2. Valores de duración de la combustión y adelanto de la combustión para las combinaciones de velocidad de giro y posición del actuador

| RPM | TOC (rad) | SOC (rad) | | | | | |
|----------|-----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| P0 - P16 | P0 - P16 | P0 | P2 | P4 | P8 | P12 | P16 |
| 500 | 0.280 | -0.107 | -0.114 | -0.121 | -0.134 | -0.148 | -0.163 |
| 1000 | 0.396 | -0.152 | -0.162 | -0.172 | -0.190 | -0.210 | -0.231 |
| 1500 | 0.485 | -0.186 | -0.198 | -0.210 | -0.233 | -0.257 | -0.283 |
| 2000 | 0.560 | -0.215 | -0.229 | -0.243 | -0.269 | -0.297 | -0.326 |
| 2500 | 0.626 | -0.240 | -0.256 | -0.271 | -0.301 | -0.332 | -0.365 |
| 3000 | 0.686 | -0.263 | -0.280 | -0.297 | -0.329 | -0.363 | -0.400 |
| 3500 | 0.741 | -0.287 | -0.302 | -0.321 | -0.356 | -0.393 | -0.432 |
| 4000 | 0.792 | -0.304 | -0.323 | -0.343 | -0.380 | -0.420 | -0.462 |
| 4500 | 0.840 | -0.322 | -0.343 | -0.364 | -0.403 | -0.445 | -0.490 |
| 5000 | 0.885 | -0.339 | -0.362 | -0.384 | -0.425 | -0.469 | -0.516 |

Cuadro A.2: Valores de TOC y SOC en radianes para todas las posiciones y velocidades de giro incluidas en el estudio

A.2. Casos

A.2.1. Casos para la validación

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Grado de carga (%) | Nº Caso |
|----------|-------------------------|-------------------|--------------------|---------|
| 2 | 2000 | 1.05 | 2.5 | 1 |
| | | | 4 | 2 |
| | | | 7 | 3 |
| | | | 10 | 4 |
| | | | 20 | 5 |
| | | | 40 | 6 |
| | | | 60 | 7 |
| | | 1.25 | 1 | 8 |
| | | | 2 | 9 |
| | | | 4 | 10 |
| | | | 7 | 11 |
| | | | 10 | 12 |
| | | | 20 | 13 |
| | | | 40 | 14 |
| | | 1.5 | 60 | 15 |
| | | | 1 | 16 |
| | | | 2 | 17 |
| | | | 4 | 18 |
| | | | 7 | 19 |
| | | | 10 | 20 |

Cuadro A.3: Casos usados para la comprobación de la interfaz

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Grado de carga (%) | Nº Caso |
|----------|-------------------------|-------------------|--------------------|---------|
| 2 | 1000 | 1.1 | 100 | 21 |
| | 1000 | 1.05 | 100 | 22 |
| | 2000 | 1.05 | 100 | 23 |
| | 2000 | 1.1 | 100 | 24 |
| | 2500 | 1.1 | 100 | 25 |

Cuadro A.4: Casos usados para la validación del modelo en interfaz

A.2.2. Casos para la selección del ratio de mezcla

| Posición | Ratio de mezcla | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Nº Caso |
|----------|-----------------|-------------------------|-------------------|---------|
| 2 | 0 | 500 | 1.05 | 1 |
| | | | 1.15 | 2 |
| | | | 1.25 | 3 |
| | | | 1.35 | 4 |
| | | 1000 | 1.05 | 5 |
| | | | 1.15 | 6 |
| | | | 1.25 | 7 |
| | | | 1.35 | 8 |
| | | 1500 | 1.05 | 9 |
| | | | 1.15 | 10 |
| | | | 1.25 | 11 |
| | | | 1.35 | 12 |
| | | 2000 | 1.05 | 13 |
| | | | 1.15 | 14 |
| | | | 1.25 | 15 |
| | | | 1.35 | 16 |
| | | 2500 | 1.05 | 17 |
| | | | 1.15 | 18 |
| | | | 1.25 | 19 |
| | | | 1.35 | 20 |
| | | 3000 | 1.05 | 21 |
| | | | 1.15 | 22 |
| | | | 1.25 | 23 |
| | | | 1.35 | 24 |
| | | 3500 | 1.05 | 25 |
| | | | 1.15 | 26 |
| | | | 1.25 | 27 |
| | | | 1.35 | 28 |
| | | 4000 | 1.05 | 29 |
| | | | 1.15 | 30 |
| | | | 1.25 | 31 |
| | | | 1.35 | 32 |

Cuadro A.5: Casos de la posición 2, ratio 0, para la elección de ratio de mezcla

| Posición | Ratio de mezcla | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Nº Caso |
|----------|-----------------|-------------------------|-------------------|---------|
| 2 | 0.5 | 500 | 1.05 | 33 |
| | | | 1.15 | 34 |
| | | | 1.25 | 35 |
| | | | 1.35 | 36 |
| | | 1000 | 1.05 | 37 |
| | | | 1.15 | 38 |
| | | | 1.25 | 39 |
| | | | 1.35 | 40 |
| | | 1500 | 1.05 | 41 |
| | | | 1.15 | 42 |
| | | | 1.25 | 43 |
| | | | 1.35 | 44 |
| | | 2000 | 1.05 | 45 |
| | | | 1.15 | 46 |
| | | | 1.25 | 47 |
| | | | 1.35 | 48 |
| | | 2500 | 1.05 | 49 |
| | | | 1.15 | 50 |
| | | | 1.25 | 51 |
| | | | 1.35 | 52 |
| | | 3000 | 1.05 | 53 |
| | | | 1.15 | 54 |
| | | | 1.25 | 55 |
| | | | 1.35 | 56 |
| | | 3500 | 1.05 | 57 |
| | | | 1.15 | 58 |
| | | | 1.25 | 59 |
| | | | 1.35 | 60 |
| | | 4000 | 1.05 | 61 |
| | | | 1.15 | 62 |
| | | | 1.25 | 63 |
| | | | 1.35 | 64 |

Cuadro A.6: Casos de la posición 2, ratio 0.5, para la elección de ratio de mezcla

| Posición | Ratio de mezcla | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Nº Caso |
|----------|-----------------|-------------------------|-------------------|---------|
| 2 | 1 | 500 | 1.05 | 65 |
| | | | 1.15 | 66 |
| | | | 1.25 | 67 |
| | | | 1.35 | 68 |
| | | 1000 | 1.05 | 69 |
| | | | 1.15 | 70 |
| | | | 1.25 | 71 |
| | | | 1.35 | 72 |
| | | 1500 | 1.05 | 73 |
| | | | 1.15 | 74 |
| | | | 1.25 | 75 |
| | | | 1.35 | 76 |
| | | 2000 | 1.05 | 77 |
| | | | 1.15 | 78 |
| | | | 1.25 | 79 |
| | | | 1.35 | 80 |
| | | 2500 | 1.05 | 81 |
| | | | 1.15 | 82 |
| | | | 1.25 | 83 |
| | | | 1.35 | 84 |
| 3000 | 1.05 | 85 | | |
| | 1.15 | 86 | | |
| | 1.25 | 87 | | |
| | 1.35 | 88 | | |
| 3500 | 1.05 | 89 | | |
| | 1.15 | 90 | | |
| | 1.25 | 91 | | |
| | 1.35 | 92 | | |
| 4000 | 1.05 | 93 | | |
| | 1.15 | 94 | | |
| | 1.25 | 95 | | |
| | 1.35 | 96 | | |

Cuadro A.7: Casos de la posición 2, ratio 1, para la elección de ratio de mezcla

A.2.3. Casos para el estudio de sobrealimentación

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Nº caso |
|----------|-------------------------|-------------------|---------|
| 0 | 500 | 1.05 | 1 |
| | | 1.15 | 2 |
| | | 1.25 | 3 |
| | | 1.35 | 4 |
| | | 1.45 | 5 |
| | | 1.55 | 6 |
| | 1000 | 1.05 | 7 |
| | | 1.15 | 8 |
| | | 1.25 | 9 |
| | | 1.35 | 10 |
| | | 1.45 | 11 |
| | | 1.55 | 12 |
| | 1500 | 1.05 | 13 |
| | | 1.15 | 14 |
| | | 1.25 | 15 |
| | | 1.35 | 16 |
| | | 1.45 | 17 |
| | | 1.55 | 18 |
| | 2000 | 1.05 | 19 |
| | | 1.15 | 20 |
| | | 1.25 | 21 |
| | | 1.35 | 22 |
| | | 1.45 | 23 |
| | | 1.55 | 24 |

Cuadro A.8: Casos posición 0 para estudio de sobrealimentación (1)

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Nº caso |
|----------|-------------------------|-------------------|---------|
| 0 | 2500 | 1.05 | 25 |
| | | 1.15 | 26 |
| | | 1.25 | 27 |
| | | 1.35 | 28 |
| | | 1.45 | 29 |
| | | 1.55 | 30 |
| | 3000 | 1.05 | 31 |
| | | 1.15 | 32 |
| | | 1.25 | 33 |
| | | 1.35 | 34 |
| | | 1.45 | 35 |
| | | 1.55 | 36 |
| | 3500 | 1.05 | 37 |
| | | 1.15 | 38 |
| | | 1.25 | 39 |
| | | 1.35 | 40 |
| | | 1.45 | 41 |
| | | 1.55 | 42 |
| | 4000 | 1.05 | 43 |
| | | 1.15 | 44 |
| 1.25 | | 45 | |
| 1.35 | | 46 | |
| 1.45 | | 47 | |
| 1.55 | | 48 | |

Cuadro A.9: Casos posición 0 para estudio de sobrealimentación (2)

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Nº caso |
|----------|-------------------------|-------------------|---------|
| 4 | 500 | 1.05 | 49 |
| | | 1.15 | 50 |
| | | 1.25 | 51 |
| | | 1.35 | 52 |
| | | 1.45 | 53 |
| | | 1.55 | 54 |
| | 1000 | 1.05 | 55 |
| | | 1.15 | 56 |
| | | 1.25 | 57 |
| | | 1.35 | 58 |
| | | 1.45 | 59 |
| | | 1.55 | 60 |
| | 1500 | 1.05 | 61 |
| | | 1.15 | 62 |
| | | 1.25 | 63 |
| | | 1.35 | 64 |
| | | 1.45 | 65 |
| | | 1.55 | 66 |
| | 2000 | 1.05 | 67 |
| | | 1.15 | 68 |
| | | 1.25 | 69 |
| | | 1.35 | 70 |
| | | 1.45 | 71 |
| | | 1.55 | 72 |

Cuadro A.10: Casos posición 4 para estudio de sobrealimentación (1)

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Nº caso |
|----------|-------------------------|-------------------|---------|
| 4 | 2500 | 1.05 | 73 |
| | | 1.15 | 74 |
| | | 1.25 | 75 |
| | | 1.35 | 76 |
| | | 1.45 | 77 |
| | | 1.55 | 78 |
| | 3000 | 1.05 | 79 |
| | | 1.15 | 80 |
| | | 1.25 | 81 |
| | | 1.35 | 82 |
| | | 1.45 | 83 |
| | | 1.55 | 84 |
| | 3500 | 1.05 | 85 |
| | | 1.15 | 86 |
| | | 1.25 | 87 |
| | | 1.35 | 88 |
| | | 1.45 | 89 |
| | | 1.55 | 90 |
| | 4000 | 1.05 | 91 |
| | | 1.15 | 92 |
| 1.25 | | 93 | |
| 1.35 | | 94 | |
| 1.45 | | 95 | |
| 1.55 | | 96 | |

Cuadro A.11: Casos posición 4 para estudio de sobrealimentación (2)

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Nº caso |
|----------|-------------------------|-------------------|---------|
| 8 | 500 | 1.05 | 97 |
| | | 1.15 | 98 |
| | | 1.25 | 99 |
| | | 1.35 | 100 |
| | | 1.45 | 101 |
| | | 1.55 | 102 |
| | 1000 | 1.05 | 103 |
| | | 1.15 | 104 |
| | | 1.25 | 105 |
| | | 1.35 | 106 |
| | | 1.45 | 107 |
| | | 1.55 | 108 |
| | 1500 | 1.05 | 109 |
| | | 1.15 | 110 |
| | | 1.25 | 111 |
| | | 1.35 | 112 |
| | | 1.45 | 113 |
| | | 1.55 | 114 |
| | 2000 | 1.05 | 115 |
| | | 1.15 | 116 |
| 1.25 | | 117 | |
| 1.35 | | 118 | |
| 1.45 | | 119 | |
| 1.55 | | 120 | |

Cuadro A.12: Casos posición 8 para estudio de sobrealimentación (1)

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Nº caso |
|----------|-------------------------|-------------------|---------|
| 8 | 2500 | 1.05 | 121 |
| | | 1.15 | 122 |
| | | 1.25 | 123 |
| | | 1.35 | 124 |
| | | 1.45 | 125 |
| | | 1.55 | 126 |
| | 3000 | 1.05 | 127 |
| | | 1.15 | 128 |
| | | 1.25 | 129 |
| | | 1.35 | 130 |
| | | 1.45 | 131 |
| | | 1.55 | 132 |
| | 3500 | 1.05 | 133 |
| | | 1.15 | 134 |
| | | 1.25 | 135 |
| | | 1.35 | 136 |
| | | 1.45 | 137 |
| | | 1.55 | 138 |
| | 4000 | 1.05 | 139 |
| | | 1.15 | 140 |
| 1.25 | | 141 | |
| 1.35 | | 142 | |
| 1.45 | | 143 | |
| 1.55 | | 144 | |

Cuadro A.13: Casos posición 8 para estudio de sobrealimentación (2)

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Nº caso |
|----------|-------------------------|-------------------|---------|
| 12 | 500 | 1.05 | 145 |
| | | 1.15 | 146 |
| | | 1.25 | 147 |
| | | 1.35 | 148 |
| | | 1.45 | 149 |
| | | 1.55 | 150 |
| | 1000 | 1.05 | 151 |
| | | 1.15 | 152 |
| | | 1.25 | 153 |
| | | 1.35 | 154 |
| | | 1.45 | 155 |
| | | 1.55 | 156 |
| | 1500 | 1.05 | 157 |
| | | 1.15 | 158 |
| | | 1.25 | 159 |
| | | 1.35 | 160 |
| | | 1.45 | 161 |
| | | 1.55 | 162 |
| 2000 | 1.05 | 163 | |
| | 1.15 | 164 | |
| | 1.25 | 165 | |
| | 1.35 | 166 | |
| | 1.45 | 167 | |
| | 1.55 | 168 | |

Cuadro A.14: Casos posición 12 para estudio de sobrealimentación (1)

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Nº caso |
|----------|-------------------------|-------------------|---------|
| 12 | 2500 | 1.05 | 169 |
| | | 1.15 | 170 |
| | | 1.25 | 171 |
| | | 1.35 | 172 |
| | | 1.45 | 173 |
| | | 1.55 | 174 |
| | 3000 | 1.05 | 175 |
| | | 1.15 | 176 |
| | | 1.25 | 177 |
| | | 1.35 | 178 |
| | | 1.45 | 179 |
| | | 1.55 | 180 |
| | 3500 | 1.05 | 181 |
| | | 1.15 | 182 |
| | | 1.25 | 183 |
| | | 1.35 | 184 |
| | | 1.45 | 185 |
| | | 1.55 | 186 |
| | 4000 | 1.05 | 187 |
| | | 1.15 | 188 |
| 1.25 | | 189 | |
| 1.35 | | 190 | |
| 1.45 | | 191 | |
| 1.55 | | 192 | |

Cuadro A.15: Casos posición 12 para estudio de sobrealimentación (2)

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Nº caso |
|----------|-------------------------|-------------------|---------|
| 16 | 500 | 1.05 | 193 |
| | | 1.15 | 194 |
| | | 1.25 | 195 |
| | | 1.35 | 196 |
| | | 1.45 | 197 |
| | | 1.55 | 198 |
| | 1000 | 1.05 | 199 |
| | | 1.15 | 200 |
| | | 1.25 | 201 |
| | | 1.35 | 202 |
| | | 1.45 | 203 |
| | | 1.55 | 204 |
| | 1500 | 1.05 | 205 |
| | | 1.15 | 206 |
| | | 1.25 | 207 |
| | | 1.35 | 208 |
| | | 1.45 | 209 |
| | | 1.55 | 210 |
| | 2000 | 1.05 | 211 |
| | | 1.15 | 212 |
| 1.25 | | 213 | |
| 1.35 | | 214 | |
| 1.45 | | 215 | |
| 1.55 | | 216 | |

Cuadro A.16: Casos posición 16 para estudio de sobrealimentación (1)

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | P_{inlet} (bar) | Nº caso |
|----------|-------------------------|-------------------|---------|
| 16 | 2500 | 1.05 | 217 |
| | | 1.15 | 218 |
| | | 1.25 | 219 |
| | | 1.35 | 220 |
| | | 1.45 | 221 |
| | | 1.55 | 222 |
| | 3000 | 1.05 | 223 |
| | | 1.15 | 224 |
| | | 1.25 | 225 |
| | | 1.35 | 226 |
| | | 1.45 | 227 |
| | | 1.55 | 228 |
| | 3500 | 1.05 | 229 |
| | | 1.15 | 230 |
| | | 1.25 | 231 |
| | | 1.35 | 232 |
| | | 1.45 | 233 |
| | | 1.55 | 234 |
| | 4000 | 1.05 | 235 |
| | | 1.15 | 236 |
| 1.25 | | 237 | |
| 1.35 | | 238 | |
| 1.45 | | 239 | |
| 1.55 | | 240 | |

Cuadro A.17: Casos posición 16 para estudio de sobrealimentación (2)

A.2.4. Casos para el estudio de posición - velocidad de giro

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | Nº Caso |
|----------|-------------------------|---------|
| 0 | 500 | 1 |
| | 1000 | 2 |
| | 1500 | 3 |
| | 2000 | 4 |
| | 2500 | 5 |
| | 3000 | 6 |
| | 3500 | 7 |
| | 4000 | 8 |
| 2 | 500 | 9 |
| | 1000 | 10 |
| | 1500 | 11 |
| | 2000 | 12 |
| | 2500 | 13 |
| | 3000 | 14 |
| | 3500 | 15 |
| | 4000 | 16 |
| 4 | 500 | 17 |
| | 1000 | 18 |
| | 1500 | 19 |
| | 2000 | 20 |
| | 2500 | 21 |
| | 3000 | 22 |
| | 3500 | 23 |
| | 4000 | 24 |

Cuadro A.18: Casos estudio de posición - velocidad de giro (1)

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | Nº Caso |
|----------|-------------------------|---------|
| 8 | 500 | 25 |
| | 1000 | 26 |
| | 1500 | 27 |
| | 2000 | 28 |
| | 2500 | 29 |
| | 3000 | 30 |
| | 3500 | 31 |
| | 4000 | 32 |
| 12 | 500 | 33 |
| | 1000 | 34 |
| | 1500 | 35 |
| | 2000 | 36 |
| | 2500 | 37 |
| | 3000 | 38 |
| | 3500 | 39 |
| | 4000 | 40 |
| 6 | 500 | 41 |
| | 1000 | 42 |
| | 1500 | 43 |
| | 2000 | 44 |
| | 2500 | 45 |
| | 3000 | 46 |
| | 3500 | 47 |
| | 4000 | 48 |

Cuadro A.19: Casos estudio de posición - velocidad de giro (2)

A.3. Casos para la comparación entre inyección directa y carburadores

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | Nº Caso |
|----------|-------------------------|---------|
| 0 | 500 | 1 |
| | 1000 | 2 |
| | 1500 | 3 |
| | 2000 | 4 |
| | 2500 | 5 |
| | 3000 | 6 |
| | 3500 | 7 |
| | 4000 | 8 |
| 2 | 500 | 9 |
| | 1000 | 10 |
| | 1500 | 11 |
| | 2000 | 12 |
| | 2500 | 13 |
| | 3000 | 14 |
| | 3500 | 15 |
| | 4000 | 16 |
| 4 | 500 | 17 |
| | 1000 | 18 |
| | 1500 | 19 |
| | 2000 | 20 |
| | 2500 | 21 |
| | 3000 | 22 |
| | 3500 | 23 |
| | 4000 | 24 |

Cuadro A.20: Casos de inyección directa (1)

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | Nº Caso |
|----------|-------------------------|---------|
| 8 | 500 | 25 |
| | 1000 | 26 |
| | 1500 | 27 |
| | 2000 | 28 |
| | 2500 | 29 |
| | 3000 | 30 |
| | 3500 | 31 |
| | 4000 | 32 |
| 12 | 500 | 33 |
| | 1000 | 34 |
| | 1500 | 35 |
| | 2000 | 36 |
| | 2500 | 37 |
| | 3000 | 38 |
| | 3500 | 39 |
| | 4000 | 40 |
| 6 | 500 | 41 |
| | 1000 | 42 |
| | 1500 | 43 |
| | 2000 | 44 |
| | 2500 | 45 |
| | 3000 | 46 |
| | 3500 | 47 |
| | 4000 | 48 |

Cuadro A.21: Casos de inyección directa (2)

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | Nº Caso |
|----------|-------------------------|---------|
| 0 | 500 | 1 |
| | 1000 | 2 |
| | 1500 | 3 |
| | 2000 | 4 |
| | 2500 | 5 |
| | 3000 | 6 |
| | 3500 | 7 |
| | 4000 | 8 |
| 2 | 500 | 9 |
| | 1000 | 10 |
| | 1500 | 11 |
| | 2000 | 12 |
| | 2500 | 13 |
| | 3000 | 14 |
| | 3500 | 15 |
| | 4000 | 16 |
| 4 | 500 | 17 |
| | 1000 | 18 |
| | 1500 | 19 |
| | 2000 | 20 |
| | 2500 | 21 |
| | 3000 | 22 |
| | 3500 | 23 |
| | 4000 | 24 |

Cuadro A.22: Casos de carburadores (1)

| Posición | Velocidad de giro (rpm) | Nº Caso |
|----------|-------------------------|---------|
| 8 | 500 | 25 |
| | 1000 | 26 |
| | 1500 | 27 |
| | 2000 | 28 |
| | 2500 | 29 |
| | 3000 | 30 |
| | 3500 | 31 |
| | 4000 | 32 |
| 12 | 500 | 33 |
| | 1000 | 34 |
| | 1500 | 35 |
| | 2000 | 36 |
| | 2500 | 37 |
| | 3000 | 38 |
| | 3500 | 39 |
| | 4000 | 40 |
| 6 | 500 | 41 |
| | 1000 | 42 |
| | 1500 | 43 |
| | 2000 | 44 |
| | 2500 | 45 |
| | 3000 | 46 |
| | 3500 | 47 |
| | 4000 | 48 |

Cuadro A.23: Casos de carburadores (2)