



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

DESARROLLO DE UN MODELO DE DIAGNÓSTICO DE LA COMBUSTIÓN PARA UN NOVEDOSO MOTOR DE 1 TIEMPO

AUTOR: CARLOS SÁNCHEZ MARTÍNEZ

TUTOR: JAIME MARTÍN DÍAZ

Curso Académico: 2019-20

AGRADECIMIENTOS

Finalizado el proyecto, me gustaría dar las gracias a todas las personas que han contribuido en su creación y a mis compañeros del CMT que han hecho que la estancia en este centro haya sido muy acogedora y enriquecedora.

En primer lugar, le debo un especial agradecimiento a Rodrigo, que fue mi guía y mi gran ayuda durante mi estancia en el CMT. Siempre estaba ahí para echarme una mano, aunque tuvieran que ser muchas veces las que tuviera que acercarse a mi ordenador a ver que estaba sucediendo.

También a Javier López Sánchez por darme la oportunidad de entrar en el CMT y facilitar mi incorporación a éste, ayudándome en cualquier problema de gestión que ha aparecido durante mi estancia.

Por otro lado, a mi tutor Jaime, que ha supuesto mi mayor ayuda durante la cuarentena producida por el COVID-19 y a quién he acudido cuando no sabía resolver los problemas que se me planteaban durante el desarrollo del proyecto.

Quisiera agradecer también a mis amigos, Andreu, Jaime, Juan, Miguel, Víctor... Que me han apoyado durante todo el proyecto y siempre eran un buen motivo para desconectar del trabajo, aunque fuera por solamente para pasar un fin de semana juntos, o para salir a dar un paseo y hablar de nuestras cosas.

Por último, mi apoyo más importante ha sido mi familia, que han tenido que aguantar día tras día mis quejas sobre el TFG y me han animado cuando se me echaba el mundo encima y pensaba que nada salía bien en el proyecto.

RESUMEN

En la actualidad, los MCIAs sufren una gran revolución por la continua evolución de los vehículos hacia una fuente motriz eléctrica. Sin embargo, actualmente, la distancia que un coche eléctrico puede recorrer puede resultar limitante para sus usuarios.

En este marco se está elaborando un novedoso motor de un tiempo con una gran potencia específica, que tiene la finalidad de convertirse en un “Range Extender” para este tipo de vehículos.

El desarrollo de este motor requiere realizar un diagnóstico de la combustión y para ello, en este proyecto, se ha adaptado una herramienta de diagnóstico existente según las características de éste. Entre estas características se pueden destacar, su funcionamiento por levas en lugar de cigüeñal o su sistema de pistones opuestos, que repercutirá en los cálculos influenciados por el volumen de la cámara.

Palabras clave: Tasa de liberación de calor (dFQL), CALMEC (herramienta de diagnóstico de la combustión), modelo virtual de VEMOD, motor de 1 tiempo.

RESUM

En l'actualitat, els MCIÀ, sofreixen una gran revolució per la contínua evolució dels vehicles cap a una font motriu elèctrica. No obstant això, actualment, la distància que un cotxe elèctric pot recórrer pot resultar limitant per als seus usuaris.

En aquest marc, s'està elaborant un nou motor d'un temps amb una gran potència específica, amb la finalitat de convertir-se en un "Range Extender" per aquest tipus de vehicles.

El desenvolupament d'aquest motor requereix realitzar una diagnosi de la combustió, i per això, s'ha adaptat una ferramenta de diagnosi existent segons les característiques d'este. Entre eixes característiques destaquen, el seu funcionament per lleva en compte de cigonyal o el seu sistema de pistons oposats, que repercutirà en els càlculs influenciats pel volum de la càmera.

Paraules clau: Taxa d'alliberació de calor (dFQL), CALMEC (ferramenta de diagnosi de la combustió), model virtual de VEMOD, motor de 1 temps.

ABSTRACT

Currently, ICE engines are going through a big revolution because of the non-stop evolution of vehicles that are heading step by step to electrical motion sources. However, the current distances that an electric car can travel can be limiting for some of their users.

In this scenario, a novel 1 stroke engine with a high power-to-weight ratio is being developed, it is supposed to work as a Range Extender for this type of vehicles.

The development of this engine requires to carry out a combustion diagnosis, and to do that, in this project, an existent diagnosis tool has been adapted according to the characteristics of the engine, such as its functioning via camshaft instead of using a crankshaft, or its opposed-piston system, that will have an effect on the calculations influenced by the chamber volume.

Keywords: Rate of Heat Release (RoHR), CALMEC (combustion diagnosis tool), virtual model of VEMOD, 1-stroke engine.

ÍNDICE

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

• Memoria	1
1. Introducción	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Objetivo.....	2
1.3. Estructura del documento.....	3
2. Diagnóstico de la combustión a partir de la presión	4
2.1. Introducción	4
2.2. Parámetros del motor-instalación.....	6
2.2.1. Relación de compresión	6
2.2.2. Deformaciones mecánicas.....	7
2.2.3. Transmisión de calor	7
2.3. Señales instantáneas	7
2.4. Variables medias	7
2.4.1. Variables de control	8
2.4.2. Variables de medida	8
3. INNEngine – El motor de 1 tiempo	9
3.1. Introducción	9
3.2. Descripción general.....	10
3.3. Funcionamiento del motor	12
3.3.1. Funcionamiento de los cilindros por parejas.....	14
3.3.2. Funcionamiento del actuador	15
4. Herramientas teóricas	19
4.1. Introducción	19
4.2. Herramienta VEMOD – Virtual Engine Model	19
4.2.1. Modelo Virtual INNEngine.....	19
4.2.2. Opción <i>Case setup</i> de VEMOD	20
4.2.3. Esquema del modelo virtual	22
4.3. Herramienta CALMEC – Versión en Matlab	24
4.3.1. Interfaz en Excel para CALMEC	26
5. Puesta a punto de la herramienta	29
5.1. Introducción	29
5.2. Resumen del procedimiento del proyecto	29

5.3. Modificaciones realizadas en CALMEC	29
6. Validación de resultados	32
6.1. Introducción	32
6.2. Primeras validaciones	32
6.3. Validación de CALMEC en otros puntos de funcionamiento.....	41
7. Conclusiones	46
7.1. Introducción	46
7.2. Herramienta CALMEC	46
7.3. Futuros proyectos	46
Bibliografía	48
• Presupuesto	49
1.1. Introducción	50
1.2. Coste de la mano de obra	50
1.3. Coste de equipos y herramientas	51
1.4. Presupuesto total	53
• Anexo.....	54
A.1. Líneas de código comentadas en 5.2.....	54
A.2. Líneas de código comentadas en 5.3.....	55
A.3. Ensayos a 2500 y 4000 rpm	56

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Esquema general del proceso de diagnóstico de la combustión a partir de la presión. [1].....	5
2.2. Variación del ratio de compresión con la posición del actuador. [2].....	6
3.1. Vista externa del motor INNEngine. [10]	9
3.2. Alzado del motor. [2].....	11
3.3. Planta del motor [2].....	11
3.4. Funcionamiento del motor [11]	13
3.5. Sistema de refrigeración [11]	14
3.6. Numeración de los cilindros en un modelo a escala [3].....	15
3.7. Sección geométrica de las lumbreras en la posición de 0 mm del actuador [2]	16
3.8. Sección geométrica de las lumbreras en la posición de 16 mm del actuador [2]	17
3.9. Volumen en el cilindro con la posición 0 mm del actuador [2]	17
3.10. Volumen en el cilindro con la posición 16 mm del actuador [2]	18
3.11. Volumen de la cámara en función de la posición del actuador [2].....	18
4.1. Módulos utilizados en VEMOD [5]	20
4.2. Ventana <i>Case Setup</i>	21
4.3. Esquema del modelo virtual del motor INNEngine.....	22
4.4. Procedimiento de la herramienta CALMEC [7].....	26
4.5. Interacción entre la interfaz de Excel y CALMEC [7].....	28
6.2.1. Presión en el cilindro durante el ciclo cerrado a 2000 rpm	32
6.2.2. Volumen en el cilindro durante el ciclo cerrado a 2000 rpm	33
6.2.3. Temperatura en cámara durante el ciclo cerrado a 2000 rpm	34
6.2.4. dFQL en el ciclo cerrado a 2000 rpm	34
6.2.5. FQL en el ciclo cerrado a 2000 rpm	35
6.2.6. Trabajo del motor a lo largo del ciclo cerrado a 2000 rpm	36

6.2.7. Calor transferido durante el ciclo cerrado desde los gases hacia los elementos físicos involucrados en la combustión a 2000 rpm	36
6.2.8. Calor específico durante el ciclo cerrado a 2000 rpm	37
6.2.9. Exponente adiabático durante el ciclo cerrado a 2000 rpm.....	38
6.2.10. Constante de los gases ideales durante el ciclo cerrado a 2000 rpm	38
6.2.11. Fracción másica de combustible durante el ciclo cerrado a 2000 rpm.....	39
6.2.12. Fracción másica de aire durante el ciclo cerrado a 2000 rpm	39
6.2.13. Fracción másica de gases quemados durante el ciclo cerrado a 2000 rpm	40
6.3.1. Temperatura en cámara durante el ciclo cerrado a 1000 rpm.....	41
6.3.2. dFQL en el ciclo cerrado a 1000 rpm	42
6.3.3. FQL en el ciclo cerrado a 1000 rpm	42
6.3.4. Calor transferido en el ciclo cerrado a 1000 rpm	43
6.3.5. Temperatura en cámara durante el ciclo cerrado a 3500 rpm.....	43
6.3.6. dFQL en el ciclo cerrado a 3500 rpm.	44
6.3.7. FQL en el ciclo cerrado a 3500 rpm.....	44
6.3.8. Calor transferido en el ciclo cerrado a 3500 rpm.	45
A.1. Determinación de <i>Last Closing</i> y <i>First Opening</i>	54
A.2. Localización del PMI a partir del PMS	54
A.3. Interpolación del volumen en función del vector de ángulos	55
A.4. Lectura y ordenación del volumen según el Cam Phasing	55
A.5. Temperatura en cámara durante el ciclo cerrado a 2500 rpm.....	56
A.6. dFQL en el ciclo cerrado a 2500 rpm.	56
A.7. FQL en el ciclo cerrado a 2500 rpm.	57
A.8. Calor transferido en el ciclo cerrado a 2500 rpm.	57
A.9. Temperatura en cámara durante el ciclo cerrado a 4000 rpm.....	58
A.10. dFQL en el ciclo cerrado a 4000 rpm.	58
A.11. FQL en el ciclo cerrado a 4000 rpm.	59
A.12. Calor transferido en el ciclo cerrado a 4000 rpm.	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas

3.1. Lista de elementos del motor [2].	12
3.2. Desfases aplicados por el actuador según su posición [2].....	16
4.1. Condiciones de contorno iniciales [2]	23
1.1. Coste total de la mano de obra.....	51
1.2. Coste total de equipos y herramientas	52
1.3. Coste total del proyecto	53

Parte I
Memoria

1. Introducción

Este documento presenta la memoria realizada por Carlos Sánchez Martínez, titulado en el Grado en Ingeniería y Tecnologías Industriales en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de la UPV. Este proyecto se ha llevado a cabo en conjunto con el Centro de Motores Térmicos de la UPV.

1.1. Antecedentes

En la actualidad, los coches eléctricos e híbridos se están convirtiendo en una opción cada vez más popular entre los compradores de nuevos vehículos, y parecen el camino a seguir hacia una circulación mundial más sostenible que la actual.

Esta situación hace que los MCIA deban adaptarse a todos los cambios que van a llegar en la manera de desplazarse, y se encuentran en un momento delicado frente a la electrificación de los transportes.

Sin embargo, los automóviles puramente eléctricos aún no son capaces de recorrer distancias superiores a unos 300 kilómetros aproximadamente y en situaciones como éstas es donde pueden tener cabida los MCIA hasta que se consiga poder alargar el recorrido de un coche eléctrico.

INNEngine ha desarrollado un motor novedoso que podría convertirse en una gran opción para la cogeneración de energía dentro de un vehículo eléctrico, cumpliendo este motor la función de *Range Extender*.

Funcionar como un *Range Extender* significa que el motor de INNEngine puede cargar el motor eléctrico mientras éste está en funcionamiento, siendo siempre el motriz el motor eléctrico. Esta aplicación es útil si no se dispone de un punto cercano para recargar el motor eléctrico del vehículo.

1.2. Objetivo

Con la finalidad de facilitar los ensayos del motor, se propone realizarlos mediante una herramienta de diagnóstico de la combustión como lo es CALMEC.

En este documento se recoge la descripción de dicho motor y las modificaciones que se han implementado a esta herramienta para obtener unos resultados acordes con datos simulados mediante la herramienta VEMOD, donde se tiene un modelo virtual del motor.

Para lograr este objetivo principal se establecen otros secundarios que se realizan secuencialmente:

1. Acondicionamiento de la herramienta de diagnóstico en Matlab.
2. Validación de los resultados obtenidos en Matlab con resultados obtenidos en el modelo virtual de VEMOD
3. Análisis de diversos casos para conocer el funcionamiento del motor en todo su rango de funcionamiento

1.3. Estructura del documento.

Este documento está formado por dos documentos principales: Memoria y presupuesto.

La memoria contiene 7 capítulos:

- **Capítulo 1: Introducción.** Introducción breve para poner en contexto al lector sobre este documento. Descripción de objetivos del trabajo y los motivos por los que se lleva a cabo.
- **Capítulo 2 y 3: Fundamentos teóricos y descripción del motor.** En estos capítulos se describe el marco teórico en el que se ha basado el proyecto, además de una descripción del funcionamiento del motor de estudio.
- **Capítulo 4: Herramientas teóricas.** Se exponen en este capítulo las herramientas VEMOD y CALMEC, que se emplean en el proyecto para analizar el comportamiento del motor.
- **Capítulo 5 y 6: Desarrollo del trabajo.** Aquí se encuentran las modificaciones realizadas en las herramientas por parte del alumno y las validaciones necesarias realizadas para comprobar que los cambios en las herramientas son correctos.
- **Capítulo 7: Conclusiones.** Por último, se encuentran en este apartado, las conclusiones obtenidas después del desarrollo del proyecto, además de trabajos futuros que se podrían realizar.

2. Diagnóstico de la combustión a partir de la presión

2.1 Introducción

Tal y como describe J.Martín Díaz en su trabajo [1], utilizar el método de diagnóstico de la combustión a partir de la presión presenta diversas ventajas para analizar la evolución del calor liberado, estas ventajas son:

1. Requiere una instalación sencilla, ya que solamente se necesita colocar un captador de presión en la cámara y medir de algunas variables medias
2. Permite un cálculo rápido de los parámetros ya que el cálculo, con las aproximaciones más sencillas, es explícito y los submodelos (blow-by, transmisión de calor...) tienen pocos requerimientos de cálculo.
3. Proporciona información abundante, siendo la más relevantes:

-Ley de liberación de calor

-Transmisión de calor a las paredes del motor

-Ruido producido por el motor

-Parámetros indicados del motor

Por todas estas razones se utilizará este método para analizar el comportamiento del motor INNEngine.

En la figura 2.1 se observa el procedimiento que se debe realizar en un diagnóstico de la combustión a partir de la presión, teniendo en cuenta que en el caso de estudio no se tendrán las mediciones de un motor en un banco de ensayo, sino las de un modelo. Debido a este hecho, se obtendrán algunas ventajas como la mayor fiabilidad de la señal de presión, ya que no dependerá de la calibración del sensor.

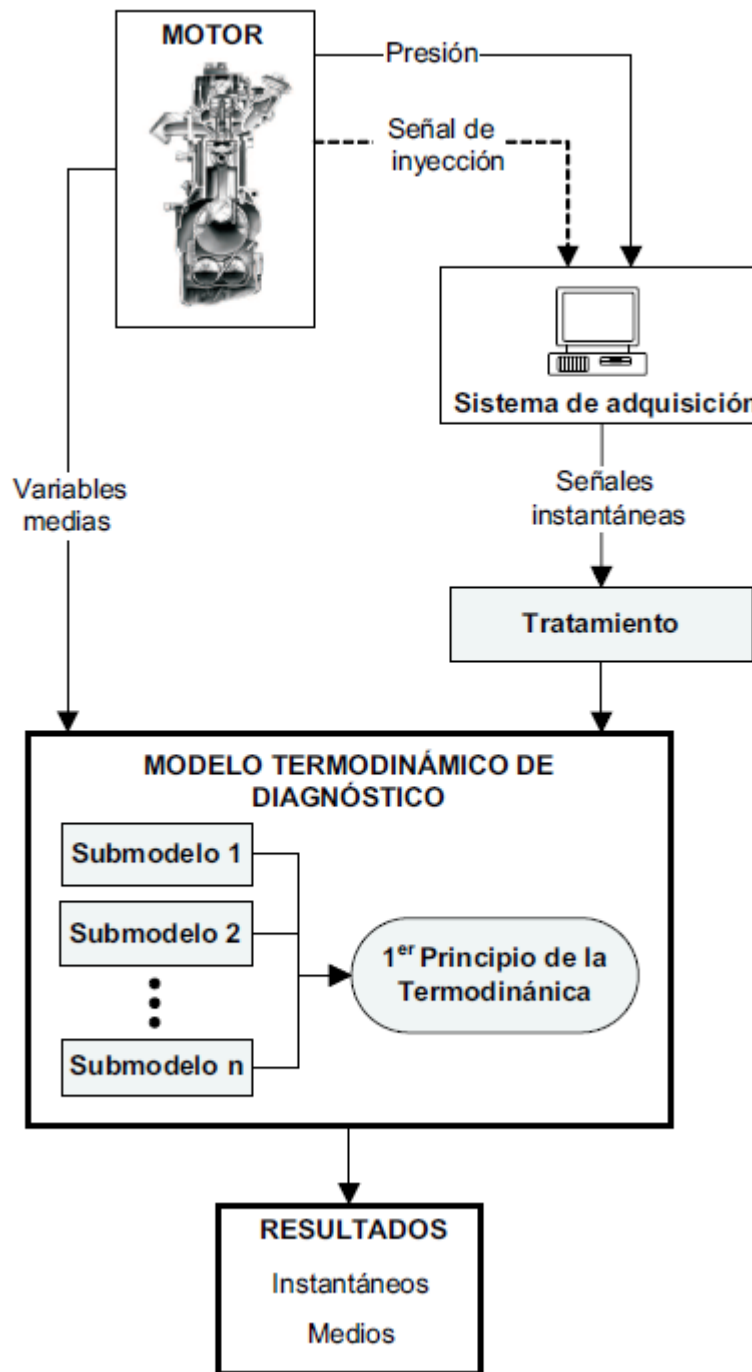


Figura 2.1 Esquema general del proceso de diagnóstico de la combustión a partir de la presión.

2.2 Parámetros del motor-instalación

A continuación, se detallan los parámetros necesarios para realizar un correcto diagnóstico de la combustión en el motor que se estudia en este proyecto.

Se ha de tener en cuenta que algunos de los factores principales en el análisis de un motor en banco no se considerarán, como por ejemplo el desfase entre la presión máxima y el volumen mínimo ya que el desfase total es conocido en este proyecto gracias a VEMOD, al proporcionar éste el valor de la presión para cada ángulo de giro de la leva.

2.2.1. Relación de compresión

El motor de estudio tiene una relación de compresión variable que depende de la posición de su actuador, elemento que será descrito más adelante en la definición del motor. Así, se deberá tener en cuenta la posición del actuador a la hora de establecer la relación de compresión.

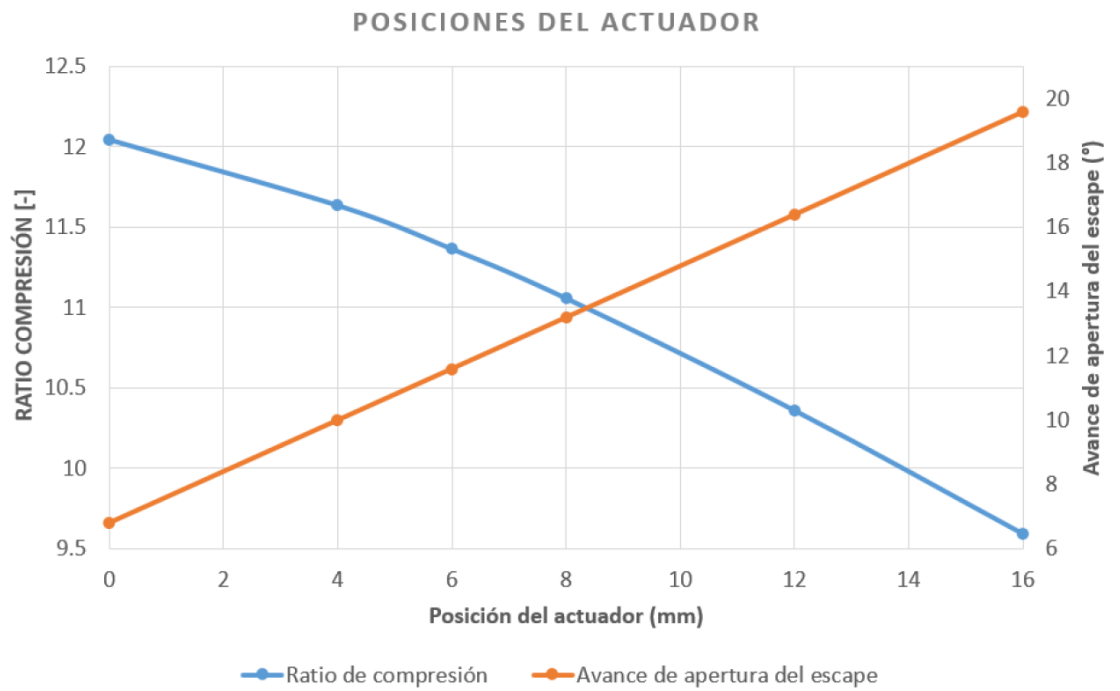


Figura 2.2: Variación del ratio de compresión con la posición del actuador

2.2.2 Deformaciones mecánicas

En el caso estudiado no se considerará el modelo de deformaciones mecánicas ya que el sistema mecánico será completamente diferente, debido a la ausencia de múltiples elementos que se encuentran en un motor convencional. Sería necesario establecer un nuevo modelo mecánico y esto queda fuera del alcance de este proyecto.

2.2.3 Transmisión de calor

En el motor estudiado, es de gran relevancia la transmisión de calor ya que se trata de un motor de pistones opuestos donde se alcanzarán grandes presiones y temperaturas que necesitarán ser controladas si se desea que el motor no sufra daños. Para analizar el calor transmitido la herramienta de cálculo utilizará un modelo derivado del modelo de Woschni, detallado en profundidad en el trabajo de Martín Díaz [1].

2.3. Señales instantáneas

El modelo de diagnóstico de la combustión que se utiliza en este proyecto hace que la medición de la presión instantánea sea indispensable. En el caso de este proyecto, se obtiene una presión instantánea directamente del modelo virtual diseñado en VEMOD, por lo que no debemos preocuparnos por la fiabilidad de los sensores analógicos de medición.

Existen también otras señales instantáneas que pueden ser de utilidad en el diagnóstico de la combustión utilizado, como la señal de inyección, si se trata de un motor diésel, la presión en los colectores o el par instantáneo. Sin embargo, éstas no son imprescindibles, y se puede prescindir de ellas para el análisis realizado en este proyecto

Como señal instantánea que recibe CALMEC en el análisis del motor INNEngine encontramos únicamente la presión en el cilindro, con posibilidad de poder incluir la lectura de otras si fueran necesarias y se hubieran realizado sus mediciones en la sala de ensayos.

2.4. Variables medias

En cualquier motor se deben comprobar una serie de variables medias para asegurar su adecuado funcionamiento y además porque se necesitan estas variables para los cálculos de la herramienta de diagnóstico empleada.

Dentro de las variables medias se pueden encontrar variables de control, que se pueden modificar directamente y variables de medida, que dependen del punto de funcionamiento que se haya establecido.

2.4.1 Variables de control

Algunas de las principales variables de control son:

- Régimen de giro medio
- Temperatura media del gas en el colector de admisión
- Presión media del gas en el colector de admisión
- Presión media del gas en el colector de escape
- Temperatura del refrigerante
- Temperatura del aceite lubricante
- Gasto másico de EGR

2.4.2 Variables de medida

Algunas de las principales variables de medida son:

- Par
- Gasto de aire
- Gasto de combustible
- Gasto de blow-by
- Temperatura media de los gases de escape

Las variables medidas se calcularán con la herramienta de diagnóstico especificada, que tiene implementado un modelo de diagnóstico de la combustión como el que plantea Martín Díaz [1] en su trabajo, basado en el primer principio de la termodinámica.

El modelo de diagnóstico se centra en el cálculo de la tasa de liberación de calor, que será desglosado y explicado a fondo más adelante en este documento, en concreto en el punto 4.3, donde se describe el funcionamiento de CALMEC. El cálculo es el siguiente:

$$dFQL = du + dW + dQ + de_{bb} + de_{f,ev}$$

3. INNEngine – El motor de un tiempo

3.1 Introducción

En este apartado se procederá a detallar en qué consiste y cómo funciona el motor INNEngine. Gran parte de la información descrita en este apartado proviene del trabajo de Galiana Amorós [2], quién realizó un trabajo exhaustivo sobre este motor.



Figura 3.1. Vista externa del motor INNEngine

3.2 Descripción general

El objetivo principal de INNEngine es crear un motor ligero con el fin de que no contribuya con un gran peso cuando se utilice dentro de un automóvil eléctrico como *Range Extender*. Para lograr esta meta, se ha simplificado en gran medida el número de elementos que componen un motor tradicional de 4 tiempos, y se han eliminado elementos como la culata o las válvulas. De esta manera se ha conseguido reducir el peso y el volumen entorno en un 75% respecto a un motor convencional de 4 tiempos con las mismas prestaciones.

Esto se consigue porque el motor de cuatro tiempos necesita dos vueltas completas del cigüeñal para completar un ciclo con combustión mientras que el motor de un tiempo es capaz de completar un ciclo con solo media vuelta de su sistema de leva que actúa como cigüeñal.

Para poder variar la apertura y cierre, de la lumbrera de escape y el ratio de compresión sin contar con elementos como las válvulas, se hará uso de un actuador, cuyo comportamiento se explicará más adelante.

El motor de un tiempo está formado por un cárter de forma cilíndrica con dos tapas. Este conjunto es atravesado por un eje hueco con cuatro orificios que están conectados a los cuatro cilindros del motor.

En cada cilindro se dispone de dos pistones enfrentados con un soporte para cojinete lineal. Entre estos dos pistones se producirá la cámara de combustión.

Próximo a las tapas del cárter se encuentran las levas que serán los elementos encargados de transformar el movimiento alternativo de los pistones en rotativo mediante un mecanismo de rampa. Este movimiento se transmite mediante unos rodamientos establecidos en los extremos de los pistones que se mantienen en una posición adecuada con muelles de compresión.

La mezcla fresca entra desde los colectores de admisión hacia los cilindros a través de las lumbreras de admisión que se encuentran libres o bloqueadas según la posición instantánea de cada pistón. Una vez se ha realizado la combustión, los gases se evacúan hacia el colector de escape mediante sus lumbreras de escape, que también se abrirán o cerrarán en función de dónde se encuentren los pistones que las bloquean o desbloquean.

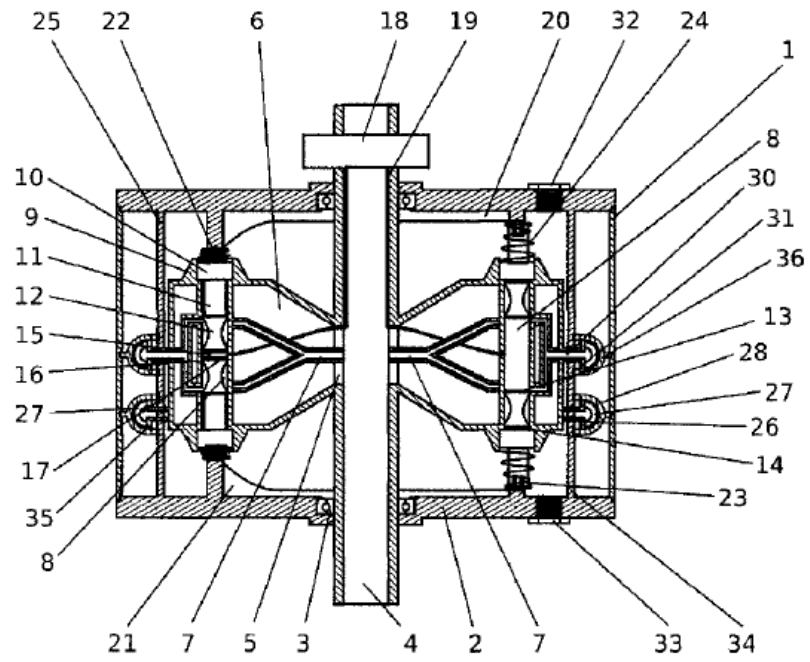


Figura 3.2. Alzado.

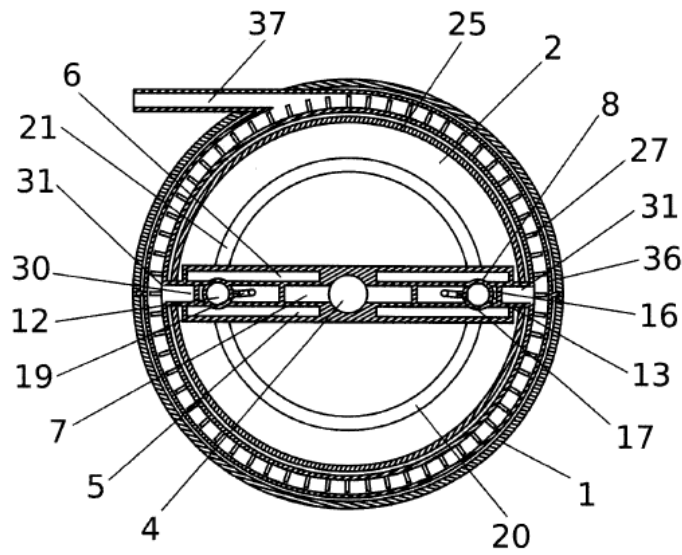


Figura 3.3. Planta del motor.

Lista de elementos

1	Cárter cilíndrico
2	Tapas del carter
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
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 de 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

Tabla 3.1. Lista de elementos del motor.

3.3 Funcionamiento del motor

El ciclo completo de este motor consta de dos etapas, las mismas que la de un 2 tiempos, una de compresión y aspiración y una de combustión y expansión. Aunque funcione de esta manera, se considera que este motor funciona como un motor de 1 tiempo porque su combustión se produce cada media vuelta de su leva, que tiene el papel de cigüeñal. Así, por cada vuelta completa de la leva, en cada cilindro se producen dos combustiones.

En cada cilindro se encuentran dos pistones enfrentados en movimiento alternativo. Estos dos pistones serán los encargados de crear la cámara de combustión que se producirá en el volumen que haya entre ellos al final de la etapa de compresión. Los pistones constan de una parte cilíndrica y otra con una forma convexa donde se encuentran los rodamientos encargados de transmitir el movimiento. Además, cada pistón cuenta al menos con un anillo de compresión y uno de engrase.

A la cámara de combustión llega la mezcla de aire y combustible que se realiza previamente en un carburador y se introduce en el cilindro a través de las lumbreras de admisión.

Se dispone de un motor de arranque que da comienzo al giro del eje motriz. Los rodamientos de los émbolos llegan al punto de la leva en el que se va a iniciar su ascenso por la rampa, en este punto se empezará a producir la compresión, pues los pistones empezarán a subir, bloqueando las lumbreras de admisión y escape y creando un volumen entre ellos cada vez menor, aumentando su presión. A partir de este momento el sistema de refrigeración empieza a funcionar, haciendo circular aire por los laterales de los pistones y los extremos del cilindro.

Cuando los pistones se encuentran en el punto más elevado de sus respectivas rampas, se produce el punto con mayor presión dentro de la cámara, en el cual se producirá la combustión y empezará la expansión mientras los émbolos descienden la rampa hasta llegar al punto de inicio de la siguiente, en el cual se volverá a iniciar el ciclo. Este movimiento alternativo de los pistones se transmitirá mediante sus rodamientos a la leva y generará así un movimiento rotativo en el eje. Debido a que cada leva tiene dos rampas, por cada giro completo de la leva obtendremos dos combustiones, como ya se ha comentado anteriormente.

Cabe destacar respecto al párrafo anterior, que el punto de combustión de la mezcla es variable, ya que las levas pueden ser desfasadas entre ellas mediante el actuador, cuyo funcionamiento se comentará más adelante.

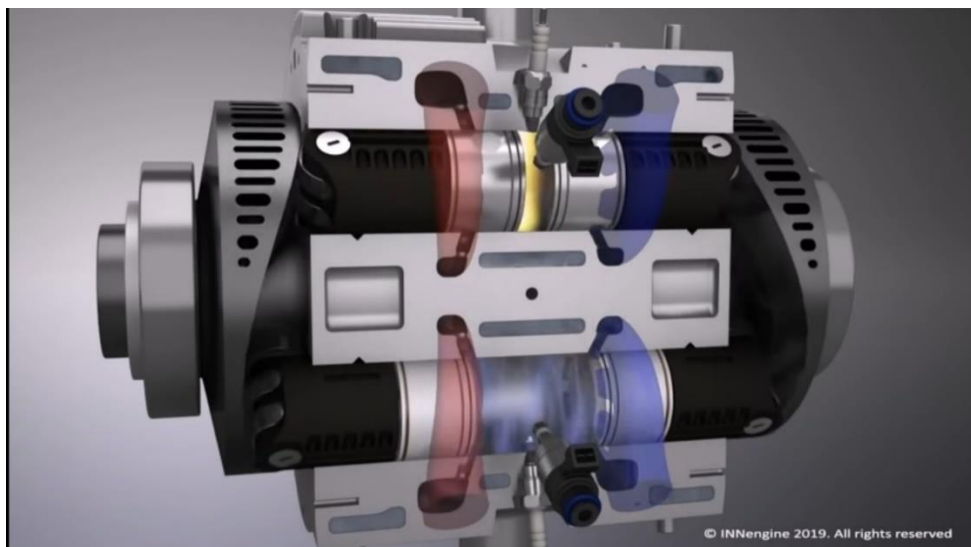


Figura 3.4. Funcionamiento del motor

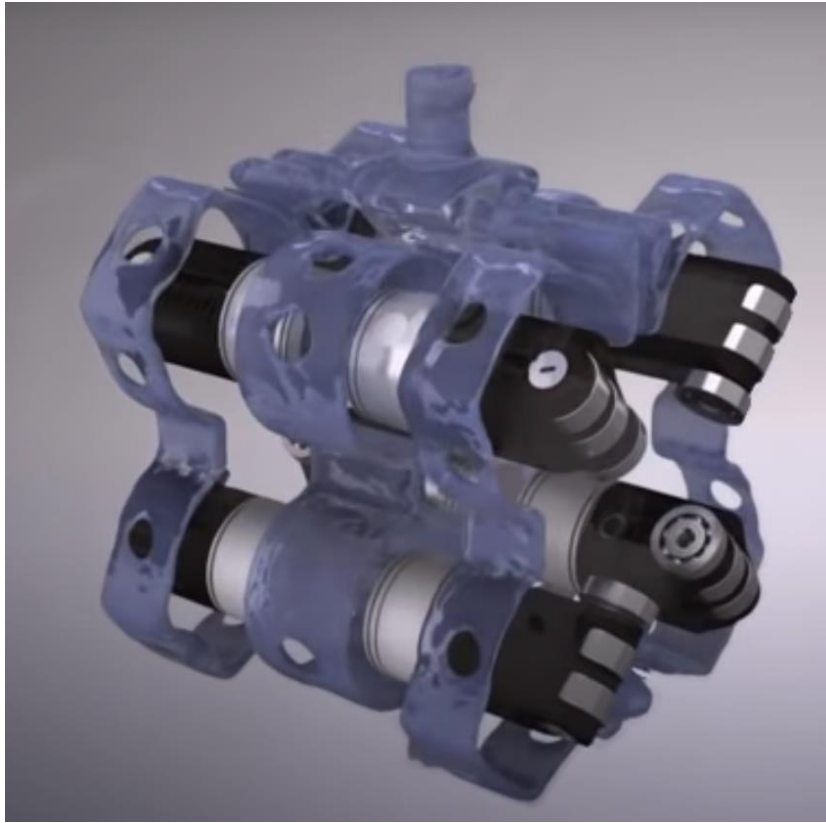


Figura 3.5. Sistema de refrigeración

3.3.1 Funcionamiento de los cilindros por parejas

Debido a la forma de las levas que rigen el comportamiento de los pistones, los cilindros tendrán el mismo comportamiento que el cilindro que se encuentra a 180 grados más adelante en la leva. Así, el cilindro 1 y el cilindro 3 combustionarán al mismo tiempo y lo mismo sucederá con el 2 y el 4.

Este funcionamiento por parejas crea un gran equilibrio en el motor y se consigue de esta manera disminuir en gran medida las vibraciones de éste, siendo este factor muy beneficioso para su aplicación como *Range Extender*. Además, este equilibrio elimina la carga radial sobre el cojinete de fricción [3], haciendo que se reduzcan las pérdidas en la transmisión de movimiento de los pistones al eje.

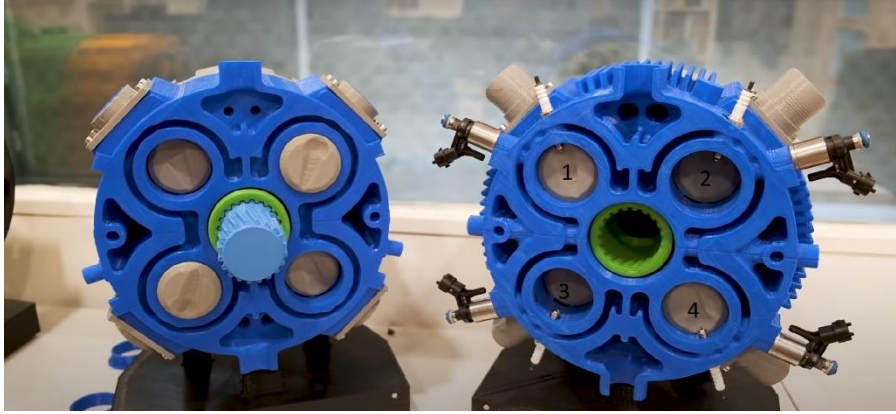


Figura 3.6. Numeración de los cilindros en un modelo a escala

Este equilibrio se produce en cada pista de levas individualmente, ya que en cada una de ellas tenemos 4 pistones, y cuando 2 suben, los otros 2 bajan, de ese modo se anulan, de manera independiente de la otra pista de levas [4].

3.3.2 Funcionamiento del actuador

Este elemento permite desfasar los dos discos de levas hasta 12.8 grados. De esta manera se puede regular el ratio de compresión, como ya se comentó en el apartado del diagnóstico de la combustión, disponemos así de lo que la empresa llama VCR (*Variable Compression Ratio*). También permite tener un control sobre las aperturas y el cierre de las lumbreras, supliendo así la falta de válvulas y proporcionando un control sobre el comportamiento de los cilindros, lo que la empresa denomina VPT (*Variable Ports Timing*).

El actuador cuenta con diferentes posiciones, y cuanto mayor es el valor de desplazamiento del actuador más se desfasan los puntos de apertura y cierre de la admisión y el escape, aumentando así el volumen en el cilindro en el momento de la combustión cuanto mayor es el ángulo de desfase. Cabe destacar que los discos siempre girarán solidariamente, aunque estén más o menos desfasados entre ellos.

En las siguientes figuras se puede observar de qué manera afecta la posición del actuador al comportamiento del motor.

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

Tabla 3.2. Desfases aplicados por el actuador según su posición.

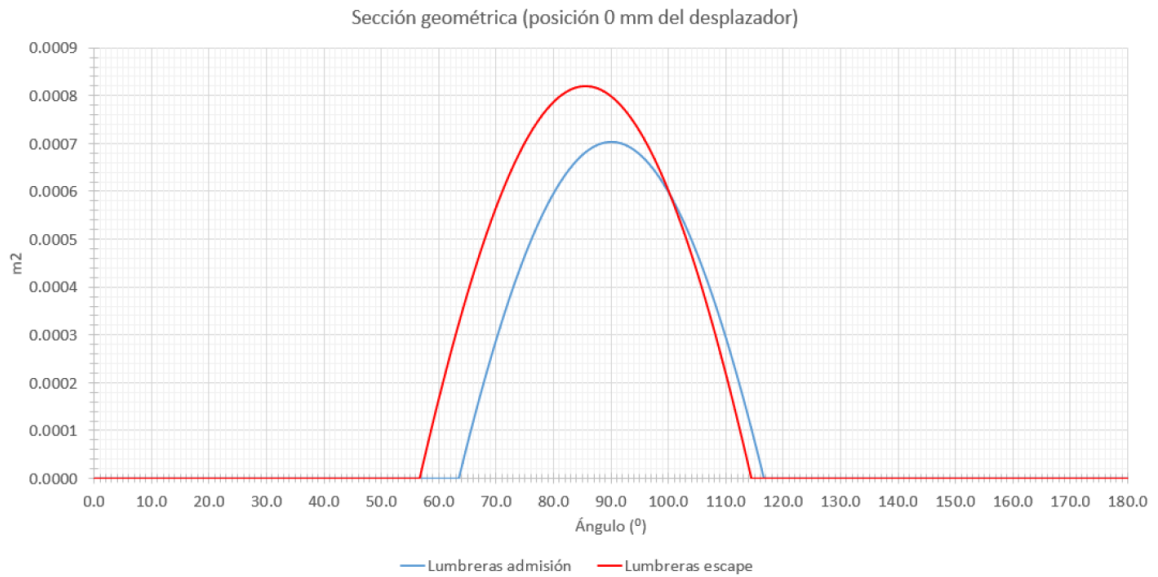


Figura 3.7 Sección geométrica de las lumbreras en la posición de 0 mm del actuador

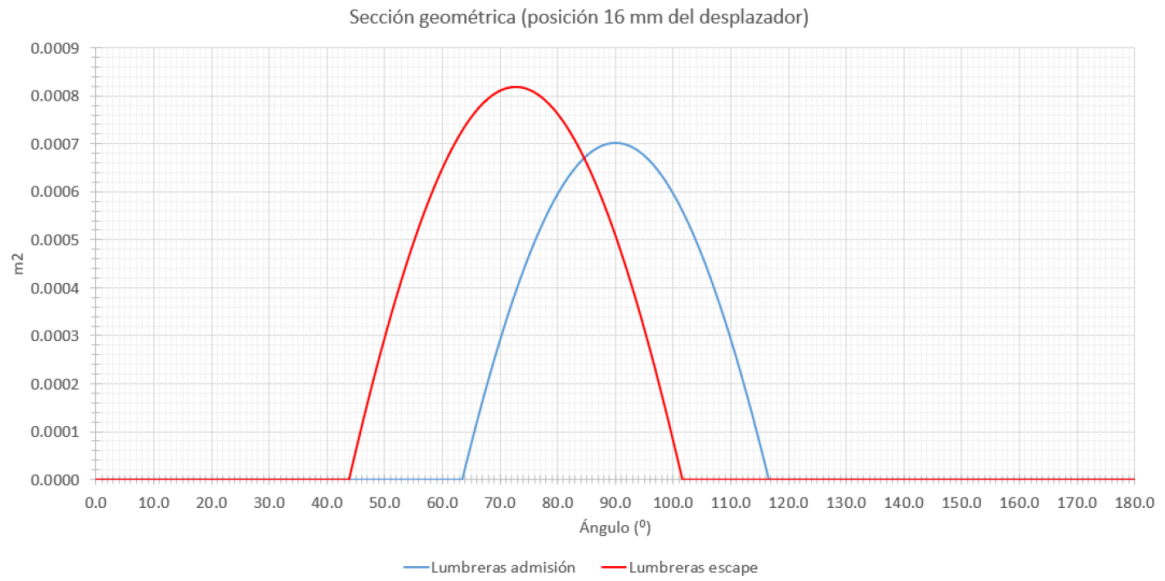
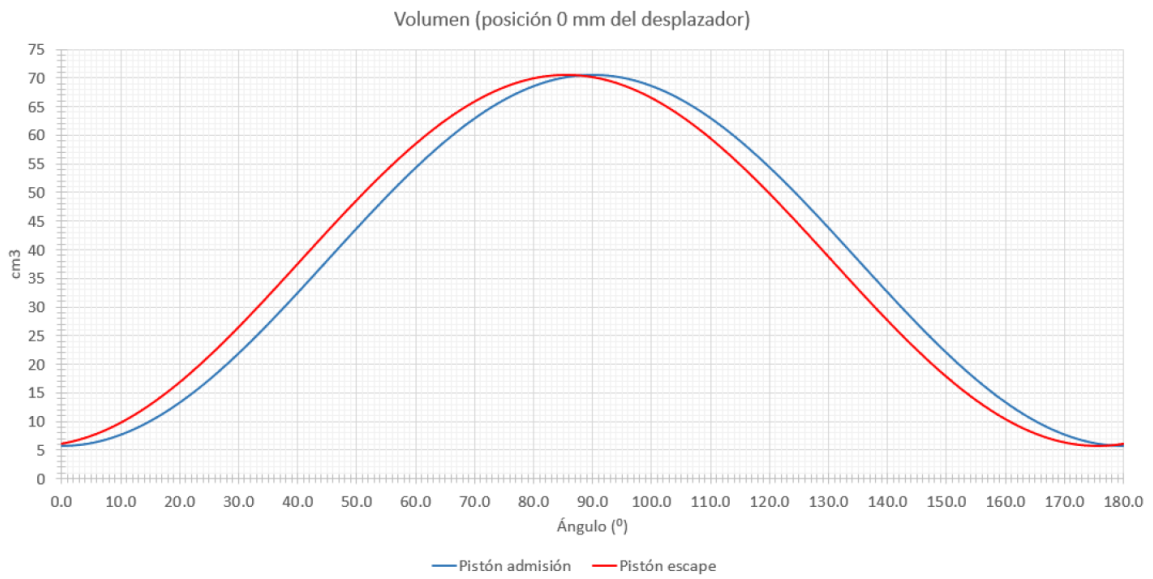
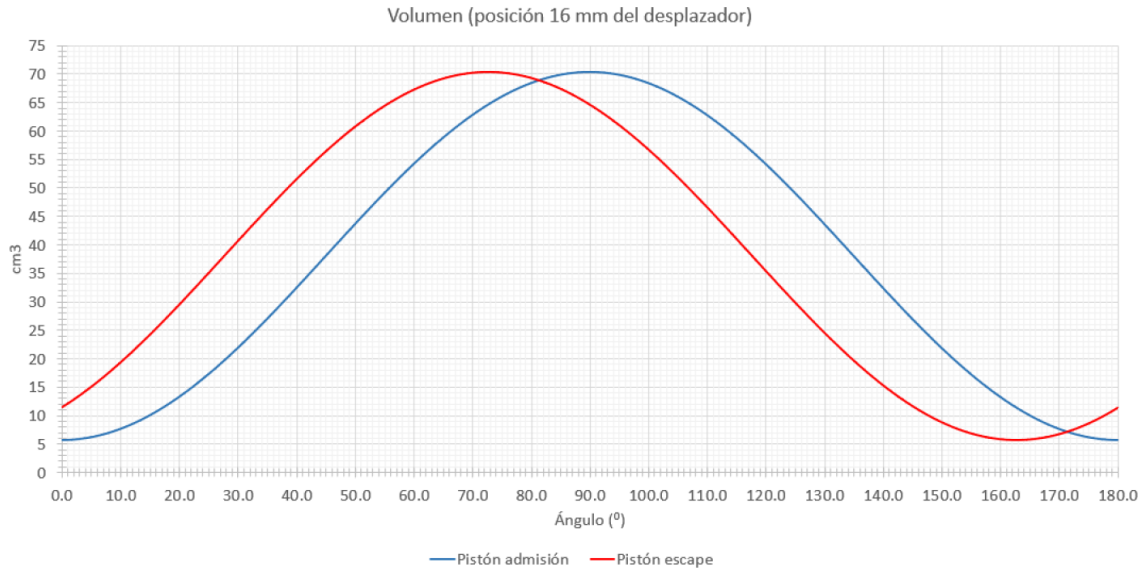


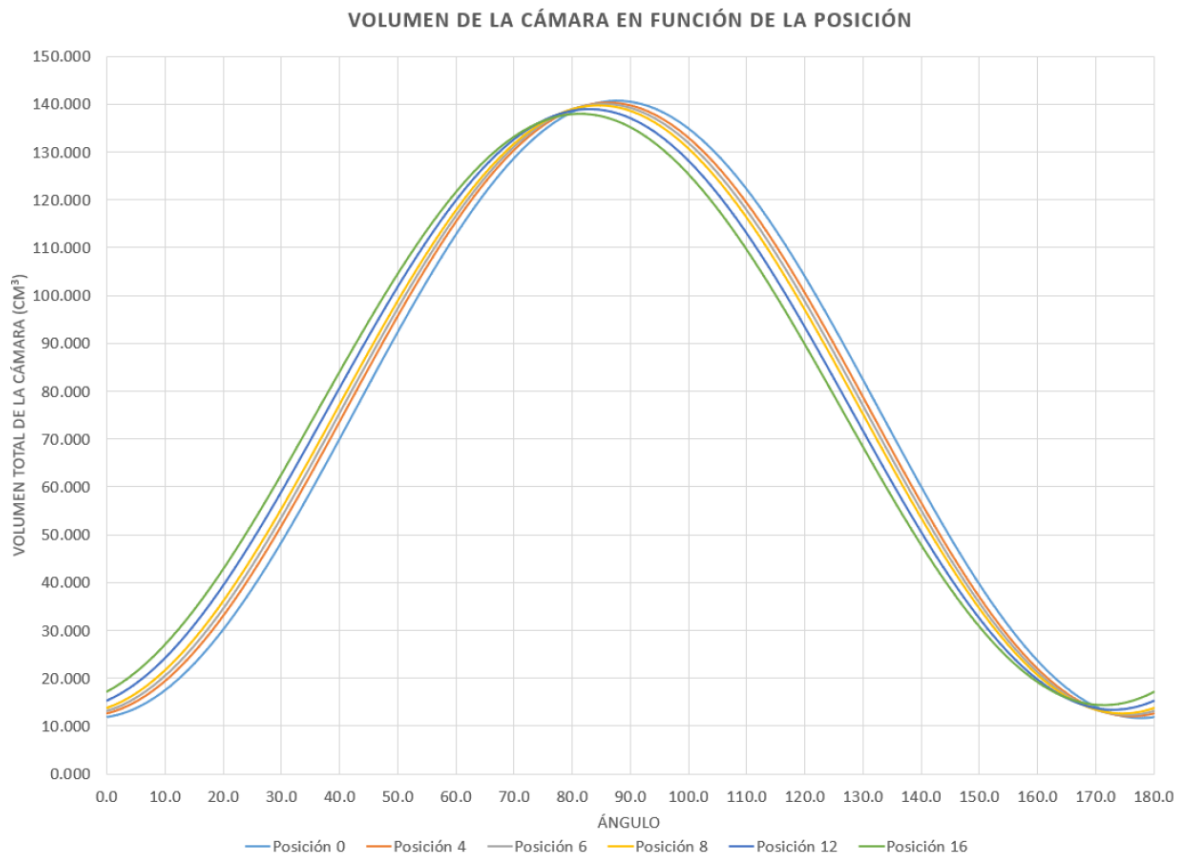
Figura 3.8. Sección geométrica de las lumbreras en la posición de 16 mm del actuador



3.9. Volumen en el cilindro con la posición 0 mm del actuador



3.10. Volumen en el cilindro con la posición 16 mm del actuador



3.11 Volumen de la cámara en función de la posición del actuador

4. Herramientas teóricas

4.1 Introducción

En este proyecto no se disponía del motor físicamente en el CMT, por este motivo, en la elaboración de este trabajo se han utilizado dos herramientas teóricas para el estudio del motor, estas son VEMOD y CALMEC. Estas herramientas suponen un ahorro de tiempo y costes económicos a la hora de analizar el motor en diferentes puntos de funcionamiento o en diferentes etapas de su desarrollo. Esto es así porque podemos realizar cambios en el modelo del motor, cambios en el punto de funcionamiento, o en alguno de sus parámetros de entrada, sin necesidad de un ensayo en banco o una modificación mecánica.

Sin embargo, aunque estas herramientas resultan muy útiles, se requiere una gran inversión de tiempo para realizar su diseño, así como un gran conocimiento de la materia que envuelve al motor y al diagnóstico de la combustión. De no ser así, probablemente se obtendrá una herramienta que no proporcione resultados fiables, convirtiéndose en una herramienta no válida para el estudio del motor.

Para conocer y poder explicar el funcionamiento de esta herramienta se han consultado tanto la propia explicación del funcionamiento realizada por sus autores [5] como otros trabajos de alumnos que han utilizado la herramienta. [2][6]

4.2 Herramienta VEMOD – Virtual Engine Model

VEMOD es una herramienta desarrollada en su totalidad por el Centro de Motores Térmicos de la Universitat Politècnica de València. Esta herramienta permite realizar modelados de motores con una interfaz intuitiva sin tener que acudir a lenguajes de programación a mano.

VEMOD está basada en un modelo fluidodinámico 1D. El flujo modelado en esta herramienta es dependiente de fenómenos pulsantes y es capaz de reproducir distribuciones de presión, de flujos y de transmisión de calor en todas las secciones significativas del motor.

Este modelo utiliza conductos unidimensionales (1D), esto quiere decir que las propiedades del flujo dependerán del momento en el que se midan y del diámetro del conducto en el que se encuentre, siendo las propiedades constantes a lo largo de cada sección longitudinal, mientras el valor de la sección no cambie. Por otro lado, los elementos como los cilindros o depósitos son diseñados como elementos volumétricos 0D.

4.2.1 Modelo Virtual INNEngine

El motor de INNEngine fue modelado en VEMOD por Galiana Amorós, el cuál esta detallado en su proyecto,[2] y será el utilizado en este trabajo como modelo de referencia con el que comparar los datos de salida que proporcione nuestra herramienta CALMEC.

Este modelo adapta con elementos de VEMOD las nuevas características que presenta el motor de INNEngine, consiguiendo unos resultados muy similares a los que se obtuvieron en bancos de ensayo, como se describe en el trabajo mencionado

En el presente proyecto se utilizará este modelo como una réplica del modelo real, pero no se modificará en gran medida el que ya está creado, por lo que se tomarán sus resultados sin profundizar en éste ni en el funcionamiento de VEMOD que se asume correcto según los resultados obtenidos por Galiana Amorós.

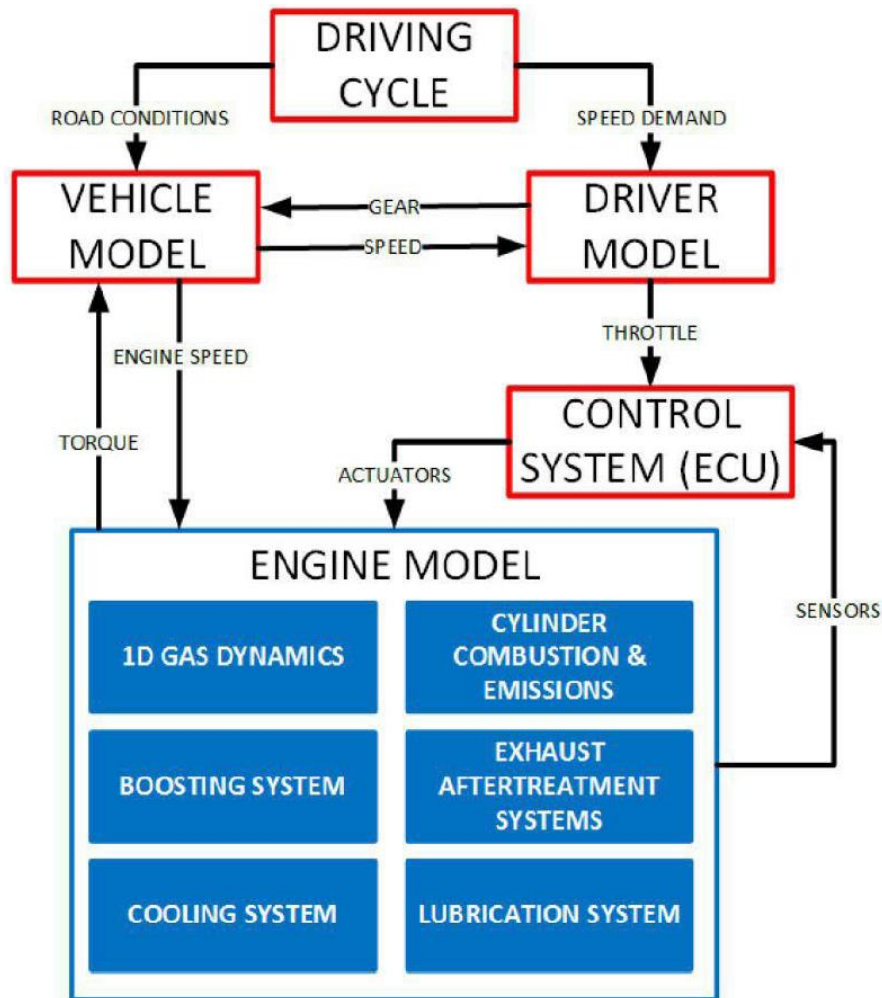


Figura 4.1 Módulos utilizados en VEMOD

4.2.2 Opción *Case setup* de VEMOD

VEMOD proporciona la posibilidad de establecer diferentes condiciones iniciales para poder configurar distintos casos sin tener que borrar casos anteriores. Además, se puede seleccionar el número de configuraciones que queremos analizar simplemente marcando o desmarcando la casilla del caso correspondiente.

Esta opción es de gran ayuda cuando queremos analizar varias configuraciones del motor sin tener que estar cambiando los datos de entrada cada vez que finaliza un caso. Además, permite realizar modificaciones individuales sin perder otros datos anteriores de manera sencilla. Será de gran utilidad a la hora de lanzar los casos de estudio con el fin de verificar el funcionamiento de CALMEC frente al de VEMOD.

Case setup

Cases number: 5

Parameter	Unit	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>
Case Name ->		Case-1	Case-2	Case-3	Case-4	Case-5
#SPEED	rpm	2000	1000	3500	4000	2500
#TPIS	K	500	500	500	500	500
#TCUL	K	500	500	500	500	500
#TCIL	K	430	430	430	430	430
#PISTON_EXH_PHA	rad	-0.0279	-0.0279	-0.0279	-0.0279	-0.0279
#SOC	rad	-0.229	-0.229	-0.229	-0.229	-0.229
#TW_EX	K	900	900	900	900	900
#TW_IN	K	300	300	300	300	300
#OPENANGEXH		0.961676	0.961676	0.961676	0.961676	0.961676
#LOAD		1	1	1	1	1
#PBOOST	Pa	110000	110000	110000	110000	110000
#TINT	K	300	300	300	300	300
#PEXH	Pa	100000	100000	100000	100000	100000
#TEXH	K	900	900	900	900	900
#PINLET	Pa	110000	110000	125000	125000	110000
#TAMB	K	300	300	300	300	300
#POUTLET	Pa	100000	100000	100000	100000	100000
#PAMB	Pa	100000	100000	100000	100000	100000

Buttons: Load (csv), Save (csv), Close

Figura 4.2 Ventana Case setup

Se puede observar en la figura 4.2 la claridad para poder realizar modificaciones de una manera sencilla. De igual manera sucede con el resto de parámetros que caracterizan a los elementos del motor, haciendo fácil para el usuario el manejo del programa aunque no se disponga de un conocimiento avanzado del mismo.

4.2.3 Esquema del modelo virtual

Como se ha comentado en apartados anteriores, nos encontramos con un modelo virtual ya realizado y funcional, que sirve como referencia para comprobar el funcionamiento de la herramienta CALMEC.

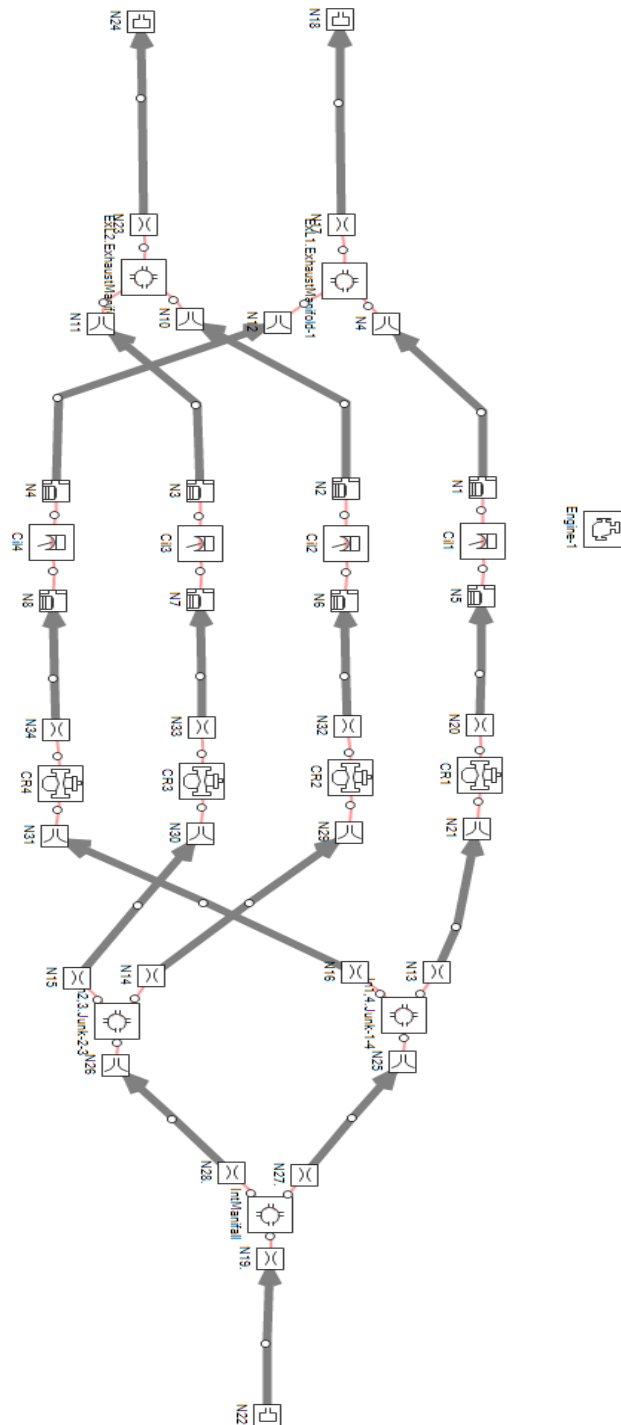


Figura 4.3 Esquema del modelo virtual del motor INNengine.

En el modelo del motor, representado en la figura 4.3 el flujo comienza en el nodo 22, el cuál impone las condiciones de contorno del ambiente iniciales. Existen 4 configuraciones de condiciones de contorno iniciales diferentes, que serán utilizadas en unos elementos u otros dependiendo de su finalidad durante el funcionamiento del motor.

-	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 4.1. Condiciones de contorno iniciales

Siguiendo el sentido indicado por las flechas en el esquema, se observa como el flujo se dirige ahora hacia el colector de admisión, denominado como *IntManifold*. Como ya se ha comentado en apartados anteriores, los conductos están modelados en 1D, y éstos se definen mediante variables como su geometría, coeficiente y tipo de fricción o su transferencia de calor, entre otros. Además, tienen establecidas unas condiciones iniciales de las mostradas en la figura 4.4 y también cuentan con opciones de mallado.

Una vez atravesado el primer conducto el flujo se encuentra en el colector de admisión, el cual se modela como un elemento 0D, de la misma manera que el resto de los colectores y depósitos. Estos elementos se definen mediante su volumen, su transmisión de calor y sus condiciones iniciales.

A partir de este punto el flujo se divide hacia los depósitos de admisión (*Junks*). Se puede observar que cada uno de ellos tiene un nodo en su entrada de flujo y dos en su salida, los primeros representan una entrada del flujo sin pérdidas, mientras que los últimos si cuentan con un coeficiente de descarga.

Desde aquí el flujo se dirige hacia los carburadores, donde se inyecta y mezcla combustible, consiguiendo una mezcla fresca con un dosado estequiométrico. Los nodos de los carburadores se comportan de la misma manera que los nodos de los depósitos de admisión, contando con una entrada ideal y una salida con pérdidas.

Una vez obtenida la mezcla fresca, esta se dirige hacia los cilindros donde se realizarán las combustiones por parejas de cilindros. Posteriormente se produce el barrido del motor con un ratio de mezcla de 0.5, que representa un punto intermedio entre mezcla perfecta y barrido perfecto.

Finalmente, el flujo se dirige hacia el escape, primero pasando por unos depósitos que permiten la unión de 3 o más elementos en VEMOD, los cuales cuentan con nodos con el mismo comportamiento que los nodos de depósitos anteriores y una vez superados éstos, el flujo se dirige a los nodos 18 y 24 que representan el escape de éste.

4.3 Herramienta CALMEC – Versión en Matlab

CALMEC es la herramienta teórica en la que se basa este proyecto, esta es la herramienta computacional de diagnóstico de la combustión que se ha modificado para poder analizar el motor INNEngine. CALMEC ha sido desarrollada y optimizada a lo largo del tiempo para obtener cada vez mejores resultados. El modelo utilizado en este proyecto es su versión en código Matlab y para entender su funcionamiento, se consultó al tutor del proyecto y además se revisaron trabajos de anteriores alumnos que trabajaron con esta versión. [6][7]

Normalmente CALMEC recibe medidas experimentales en distintos puntos de funcionamiento del motor (presión en el cilindro, presión en la admisión, régimen de giro, par) así como condiciones ambientales (temperatura, presión o humedad entre otros) de los ensayos en concreto. En este trabajo no se dispone de esos datos experimentales como se ha comentado en apartados anteriores, así que los *inputs* del programa vendrán dados por los resultados de la simulación del modelo virtual del motor INNEngine existente en VEMOD.

Además, es necesario realizar una correcta caracterización termodinámica del motor con el fin de obtener una geometría que se ajuste a las características de la cámara de combustión experimental y para poder ajustar la transmisión de calor a las paredes.

Una vez se han cumplido todos los requerimientos de funcionamiento de CALMEC, esta herramienta es capaz de calcular la tasa de liberación de calor a lo largo del ciclo, además de obtener también los valores de los factores que intervienen en el cálculo de ésta. Esta tasa de liberación de calor proporciona una gran utilidad a la hora de analizar el proceso de combustión que se produce en el ciclo cerrado.

El ciclo cerrado del motor INNEngine es bastante particular, ya que su inicio y fin dependerá de la posición del actuador. Mientras que las lumbreras de admisión siempre abren y cerrarán en los mismos puntos, las de escape se desfazan según la posición del actuador. Así, en el motor estudiado deberemos determinar cuál es la primera lumbrera que abre (*First Opening*) y cuál es la última que cierra (*Last Closing*), estos dos puntos se utilizan para establecer, el inicio del ciclo abierto (y final del cerrado) y el principio del ciclo cerrado (y final del abierto), respectivamente.

El modelo usado por CALMEC es cero-dimensional, es decir, solo se desarrolla en el tiempo, no en el espacio, considerando así propiedades constantes en todo el volumen.

La tasa de liberación se calcula aplicando el primer principio de la termodinámica a la cámara de combustión:

$$dFQL = du + dW + dQ + de_{bb} + de_{f,ev}$$

- du corresponde a la variación de energía interna, que se calcula como:

$$du = m_c c_v dT$$

Donde m_c es la masa total encerrada en la cámara de combustión, c_v es el calor específico a volumen constante que se obtiene mediante la ponderación de su fracción másica de los diferentes c_v de las sustancias que componen la mezcla de la cámara y dT representa la variación de la temperatura en la cámara.

La herramienta de cálculo establece una única zona de estudio en el cilindro: considera una única temperatura media y no diferencia entre zonas quemadas y sin quemar a la hora de calcular du . Como componentes de la mezcla, la herramienta considera 3: productos quemados, aire y combustible.

- dW representa el trabajo que ejercen los gases sobre el pistón y se calcula como:

$$dW = p dV$$

Donde dV representa la variación de volumen y p la presión, ambos parámetros referidos al volumen y presión del cilindro.

- dQ es la transmisión de calor de los gases a los componentes físicos involucrados en la combustión.

$$dQ = h A (T - T_m) dt$$

Siendo h el coeficiente de película, A la superficie que intercambia calor, T la temperatura media de los gases, T_m la temperatura de la superficie de los elementos físicos y dt el incremento de tiempo. En estudios de otros motores, el calor se transfiere principalmente a 3 elementos: pistón, culata y cilindro, sin embargo, el motor de estudio no cuenta con culata y deberá adaptarse este cálculo. Para obtener el coeficiente de película se utiliza el modelo de Woschni. [8]

- de_{bb} hace referencia al trabajo perdido por *Blow by*.

$$de_{bb} = R_c T_c dm_{bb}$$

Donde R_c es la constante de los gases ideales ponderada según la fracción másica de cada elemento de la composición del flujo, T_c la temperatura de la cámara y dm_{bb} la variación de masa perdida del cilindro al cárter a través de huecos en uniones entre elementos.

- $de_{f,ev}$ representa la energía que absorbe el combustible cuando se evapora dentro del cilindro.

$$de_{f,ev} = (h_{f,inj} - u_{f,g}) dm_{f,ev}$$

Siendo $h_{f,inj}$ la entalpía del combustible en estado líquido, $u_{f,g}$ la energía interna del combustible en estado gaseoso y $dm_{f,ev}$ la masa de combustible que se evapora en cada instante. Este término solamente se tendrá en cuenta cuando se trate de un motor con inyección directa. Ya que el motor estudiado funciona con inyección indirecta, el combustible entrará en la cámara ya mezclado y éste término se anulará.

En resumen, CALMEC calcula la ley de liberación de calor (fql) a partir del primer principio de la termodinámica aplicado en la cámara de combustión durante el periodo en el que el motor se encuentra en su ciclo cerrado. Este cálculo lo realiza aplicando algunas simplificaciones como un modelo isobárico e isotermo, considerando una única zona de estudio 0D y dividiendo el gas del cilindro en 3 componentes: productos quemados, aire y combustible.

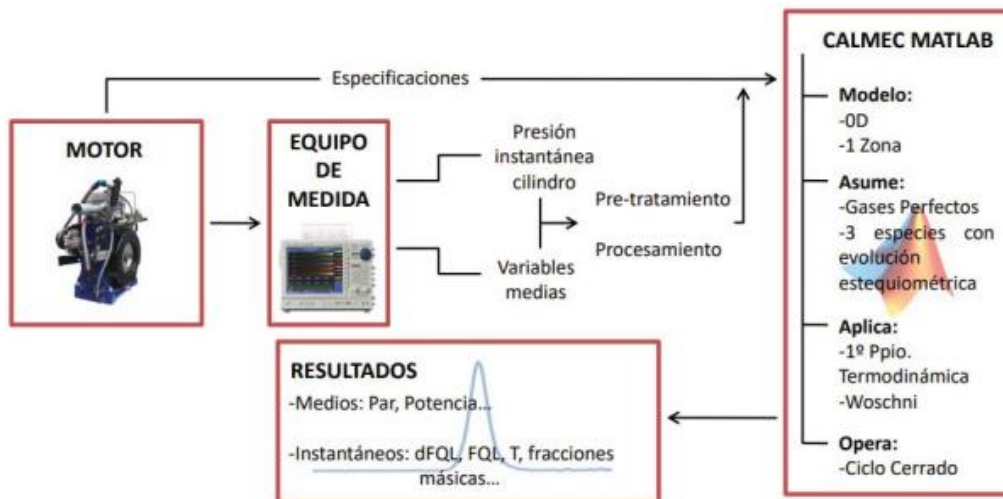


Figura 4.4. procedimiento de la herramienta CALMEC

4.3.1 Interfaz en Excel para CALMEC

Con el fin de poder utilizar CALMEC con diferentes motores y en diferentes condiciones sin tener que modificar el código, se le proporcionan datos de configuración, variables medias y variables instantáneas de manera externa.

El fichero externo más importante es el de configuración, este fichero debe modificarse con cuidado ya que de él depende que CALMEC reciba los parámetros de entrada adecuados para su correcto funcionamiento. El documento de configuración se divide en diferentes hojas que son :

- “*Engine*” : En esta hoja se encuentran parámetros como las características geométricas del motor, cantidad de cilindros que contiene (Z) , número de tiempos (NOS) , ángulos de apertura y cierre o coeficientes de descarga y pérdidas mecánicas entre otros. Se divide en 6 campos que son: “Main”, “Masses”, “Valve train” (se le denomina VT en el código), “Injection”, “Mechanical Losses” y “Other”
- “*Fluid*” : En este apartado se especifican el tipo de combustible utilizado (gasoil, gas natural o gasolina) y sus características, como el poder calorífico, el dosado estequiométrico o la densidad.
- “*Instrumentation*” : Se especifica en esta parte de la configuración las variables que ha sido posible medir en la sala de ensayo como la presión en cámara para cada cilindro, presión de inyección o la tasa de inyección, entre otros. Además, en este apartado se establecen también el número de ciclos medidos y el número de puntos de cada ciclo.
- “*Constants*” : Establece las constantes de los modelos de transmisión de calor y pérdidas mecánicas que usa CALMEC para realizar sus cálculos. Estos parámetros son constantes y no deben cambiarse a excepción de que el método no funcione correctamente y alguna constante necesite un ajuste, siempre con conocimiento del funcionamiento del método de cálculo.
- “*Adjustment*” : Contiene los parámetros que se han obtenido a partir de la caracterización del motor. Éstos se obtienen a través de un método iterativo que, teniendo como referencia unos valores iniciales, ajusta estos parámetros hasta que se obtiene una liberación de calor nula en ausencia de combustión.
- “*Mean variables*” : Esta hoja contiene los nombres de las variables medias que van a aparecer en el código y en qué unidades deben introducirse. También hay que indicar cuál es el nombre que adoptan estas variables en el fichero de variables medias que tiene CALMEC como *input*, además de seleccionar las variables que queremos cargar o no, poniendo un 0 o un 1 en ésta hoja de excel. Con esta información, CALMEC buscará los nombres de las variables que hayamos habilitado con un 1 en el fichero de variables medias de entrada, comparando todos los nombres de las cabeceras con los nombres que hemos establecido en el fichero de configuración.

- “Options” : En este apartado se puede elegir la opción de cálculo que se quiera utilizar en los distintos modelos, se puede habilitar o no su ejecución durante el análisis y también se puede configurar de qué manera obtiene algunas variables como la masa al cierre (esto es, la masa contenida en el cilindro al inicio del ciclo cerrado), que se puede obtener mediante ajuste o se puede imponer externamente si se conoce su valor.
- “Launcher” : Especifica la ruta del fichero en el que se encuentran las variables medias, los nombres de los ensayos que se quieran analizar, y además permite la elección de la configuración de ensayo, pudiendo elegir entre estacionario o transitorio y entre arrastre, combustión o pseudoarrastre.
- “Auxiliar” : Esta hoja facilita las modificaciones de combustible y la selección de modos de cálculo de CALMEC, permitiendo establecer desplegados en otras partes de la configuración y almacenando parámetros característicos de cada combustible con el fin de que se establezcan todas estas propiedades automáticamente al seleccionar gasoil, gasolina o gas natural sin tener que introducirlos uno a uno a mano.
- “VolumeINNEngine” : Esta hoja se creó expresamente para este proyecto. Contiene el volumen instantáneo en cámara obtenido a partir del modelo virtual creado en VEMOD, y será el volumen utilizado durante el análisis en Matlab.

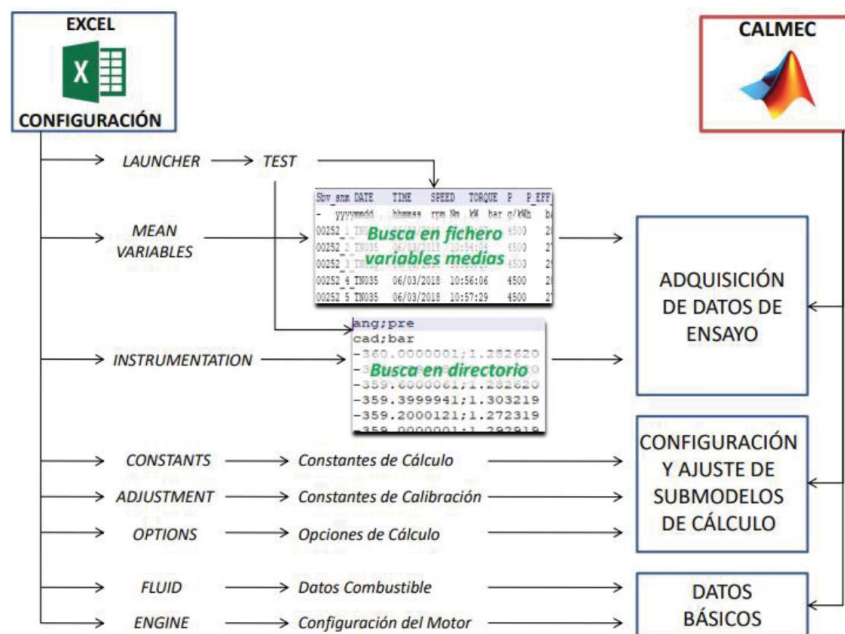


Figura 4.5. Interacción entre la interfaz de Excel y CALMEC

5. Puesta a punto de la herramienta

5.1. Introducción

En este proyecto se parte de una modificación de CALMEC incompleta, que proporcionaba innumerables errores a la hora de realizar cálculos mediante la herramienta.

Poder acomodar las funciones a CALMEC supone un reto, debido al desconocimiento de la herramienta en un principio y a unos conocimientos limitados del diagnóstico de la combustión y del motor de estudio, adquiridos en un tiempo reducido antes de empezar con las modificaciones del código.

5.2. Resumen del procedimiento del proyecto

Tras dos semanas de documentación sobre el diagnóstico de la combustión a partir de los trabajos de Armas y J.Martín [8][1] se procede al análisis del funcionamiento de la herramienta.

Una vez revisado el funcionamiento de la herramienta comienza el proceso de depuración, esto es, analizar paso por paso qué está haciendo la herramienta, dónde está fallando y por qué. Esta fase es la que más tiempo ha abarcado en la realización del proyecto.

Muchos de los problemas que se encontraban en esta herramienta aparecían porque había valores numéricos constantes que no variaban, aunque cambiara el tipo de funcionamiento del motor. Por ejemplo, el ángulo de punto muerto inferior de un cilindro siempre estaba definido como 180 grados antes del punto muerto superior, que es cierto en un 2 o 4 tiempos mientras que, en el motor de estudio, éste se encontrará 90 grados antes y después del punto muerto superior.

Por último, quedaba analizar y comparar los resultados obtenidos en CALMEC con los que proporciona el modelo virtual del motor INNEngine diseñado en VEMOD para saber si CALMEC estaba funcionando de forma correcta y coherente con el funcionamiento del motor de estudio.

5.3. Modificaciones realizadas en CALMEC

En el proceso de depuración se detectaron muchos errores de sintaxis que aparecían cuando la herramienta intentaba acceder a procedimientos de cálculo que ya estaban creados al principio de éste proyecto pero no estaban bien implementadas en CALMEC.

Una vez corregidos los errores de sintaxis, se empezaron a detectar errores de cálculo que sucedían en el programa, y se realizaron las modificaciones pertinentes para que estos errores desaparecieran. Siempre teniendo en cuenta que no solo había

que resolver estos fallos de forma que cuadraran matemáticamente, debían mantener una coherencia con el funcionamiento del motor y con lo que se pretendía calcular con la herramienta antes de la modificación.

El error más frecuente, como ya se ha comentado, lo encontramos con los ángulos que el programa consideraba constantes. Así, se establece una condición en la actualización inicial de cada cilindro donde se comprueba si el motor es de 2 o 4 tiempos o es de 1, como es el caso de estudio. Si efectivamente es de 1 tiempo, se declara una variable global *ang_PMI* que adquiere el valor de 90 grados, mientras que si es de 2 o 4 tiempos, obtiene el valor que antes se establecía constante, 180 grados.

No hay problemas con la variable global *CGradosCiclo* ya que ésta se calcula desde un primer momento a partir del número de tiempos del motor, aunque en muchas partes del código se utilizaba el valor numérico “720” (grados en los que un 4 tiempos realiza su ciclo completo) en vez de emplear la variable mencionada, así que se ha sustituido el valor numérico por la variable para que funcione correctamente en cualquier motor. Sin embargo, sí que se tendrá que modificar la forma en la que se establecen el inicio y fin del ciclo abierto y cerrado.

El motor de estudio cuenta con la peculiaridad de tener unos ángulos de apertura y cierre de la lumbrera de escape variables, como ya se ha comentado en apartados anteriores, debido al mecanismo de su actuador. Además, debido a esta variabilidad, el ciclo cerrado del motor INNEngine no empezará siempre en el cierre de la admisión ni finalizará siempre en la apertura del escape, como lo haría un 4 tiempos.

De esta manera, se debe localizar cuál de las dos lumbreras retrasa más su cierre después del PMI para inicializar el ciclo cerrado, al que se ha decidido denominar como *Last Closing*, y también qué lumbrera adelanta más su apertura después de la combustión en el PMS, *First Opening*. Con el objetivo de establecer estos dos límites, y el *ang_PMI* denominado anteriormente, se escriben las siguientes líneas de código:

A partir de los valores almacenados en *Last Closing* y *First Opening* el programa será capaz de determinar correctamente el principio y el final del ciclo cerrado en diferentes partes del código sumando o restando estos valores al valor del PMS o PMI. Estas líneas de código podrían ser útiles además en cualquier motor que no siguiera la secuencia convencional de apertura y cierre de válvulas de un motor de 4 tiempos.

De las líneas de código de la figura 5.1 también aprovechamos el *ang_PMI* una gran cantidad de veces durante la codificación de la herramienta, ya que éste valor sustituirá el valor numérico “180” que era correcto para el cálculo de un 4 tiempos o un 2 tiempos. Un ejemplo de esto son las siguientes líneas de código que se encuentran en el referenciado de la presión, las cuales están buscando el PMI a partir del PMS (Top Dead Center en el código (TPC)) :

Se aplicó la modificación porque en el motor de estudio, el PMI estará a 90 grados delante o detrás respecto al PMS, pero si establecíamos los 540 grados que utiliza el código para localizar el PMI en un 4 tiempos, el programa daba un error ya que el vector de ángulo no disponía de tantas posiciones, al abarcar solamente 180 grados por ciclo.

Se realizaron también cambios en la obtención y acceso al volumen instantáneo de cada cilindro. Se parte de un procedimiento, codificado en Matlab, que lee la hoja de Excel en la que estaba contenido el volumen del motor, descrita en el apartado de interfaz de CALMEC. Una vez que se ha leído el volumen que proviene de Excel, se desfasa según el *Cam Phasing* que se haya introducido con el actuador, ya que el volumen que se lee desde el fichero externo, es el que se obtendría en la posición 0 del actuador.

Este procedimiento ya estaba creado en el comienzo de este proyecto, sin embargo, el valor que obtenía y proporcionaba a CALMEC era erróneo, pues ordenaba el vector de volúmenes instantáneos según el volumen máximo y según el volumen mínimo, pero no mantenía la el comportamiento real del motor.

Además de corregir este proceso, se creó un nuevo procedimiento que es capaz de interpolar el volumen para un vector de ángulos que tenga un desfase angular distinto al que encontramos en la hoja de configuración.

Una vez se consiguió un vector de volúmenes adecuado se modificaron distintos procedimientos de cálculo de parámetros volumétricos según la forma y composición de elementos de un motor convencional. Como ya se dispone en este proyecto de unos volúmenes determinados para cada posición angular no es necesario realizar más cálculos relacionados con el volumen. Simplemente se debe localizar la posición del ciclo en el que el motor esta operando en el instante en el que se quiera calcular un parámetro determinado y proporcionarle el valor del volumen de ésta posición al procedimiento de cálculo que está ejecutandose.

Por último, se detectaron algunos errores de la herramienta original que habían sido corregidos en otras versiones del código, pero no con la que se estaba trabajando en el proyecto. Algunos ejemplos son el procedimiento *Calcula_Knocking*, el cual se modificó para que funcionara de la misma manera que lo hace la versión de CALMEC codificada en Visual Basic, o una corrección del procedimiento *FCALMEC* que hacía que en inyección indirecta la masa de combustible inyectada en el cilindro fuera nula.

6. Validación de resultados

6.1. Introducción

Después de realizar todos los cambios necesarios para que la herramienta se convirtiera en funcional, se realizaron diversos ensayos en diferentes puntos de funcionamiento y se compararon valores de temperatura, tasa de liberación de calor y calor transferido a lo largo del ciclo realizado por el motor.

6.2. Primeras validaciones

El primer punto de funcionamiento que se compara en el proceso de validación de este proyecto es el del motor trabajando a 2000 rpm, que es uno de los dos puntos de funcionamiento óptimo del motor designados en el trabajo de Galiana Amorós [2].

El primer paso fue comprobar que tanto la presión como el volumen en la cámara que proporcionaba CALMEC como resultados, concordaban con los resultados obtenidos en VEMOD.

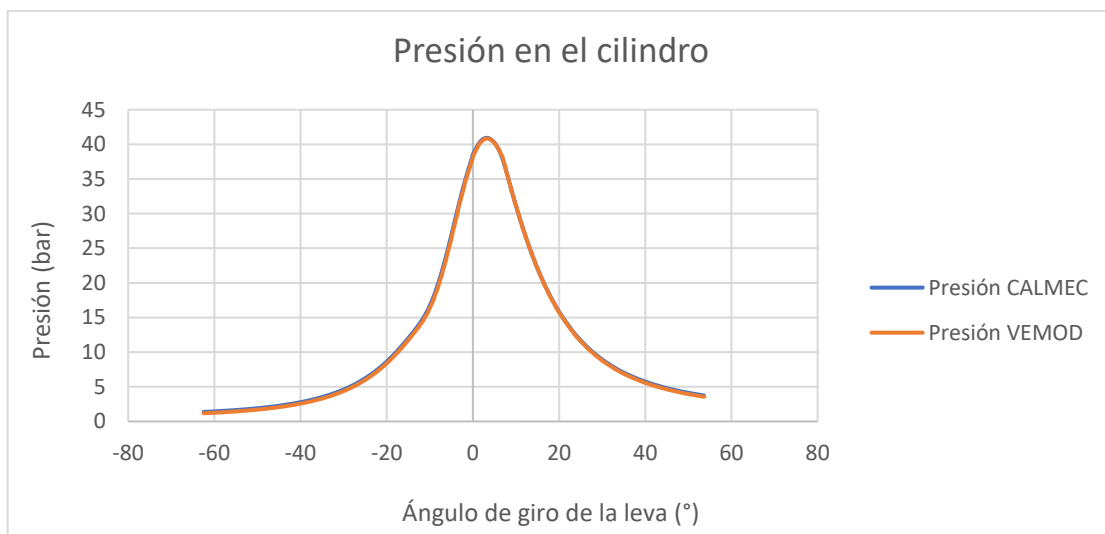


Figura 6.2.1. Presión en el cilindro durante el ciclo cerrado a 2000 rpm



Figura 6.2.2. Volumen en el cilindro durante el ciclo cerrado a 2000 rpm

Como se observa en las figuras, las diferencias son prácticamente inapreciables. Esto es lógico pues los parámetros de entrada de volumen y presión que recibe CALMEC son los que se proporcionaba VEMOD en sus resultados.

Sin embargo, obtener los mismos resultados de presión y volumen quiere decir que los procesos de tratamiento, que reciben estas dos variables durante su paso por CALMEC, están funcionando correctamente.

Una vez comprobados estos dos parámetros básicos, se compararon la tasa de liberación de calor (dFQL), el calor liberado acumulado (FQL) y la temperatura.

Con estas variables sí que se encontraron mayores diferencias, teniendo un fallo de coherencia en la dFQL y por consiguiente en la FQL. Este fallo se encuentra durante la compresión del fluido, ya que, al no haber comenzado a quemar todavía en ese punto, el calor liberado debería ser nulo, sin embargo, CALMEC proporciona valores negativos.

Estos valores negativos parece que no son muy significantes en la dFQL, sin embargo, su efecto es notorio en la FQL ya que poco a poco estos pequeños valores negativos se van acumulando.

En la temperatura en cámara también encontramos diferencias que deben ser analizadas. Tanto los fallos en la dFQL como los fallos en la temperatura son discrepancias de cálculo, que se solucionarían si los parámetros de los que dependen estuvieran correctamente ajustados.

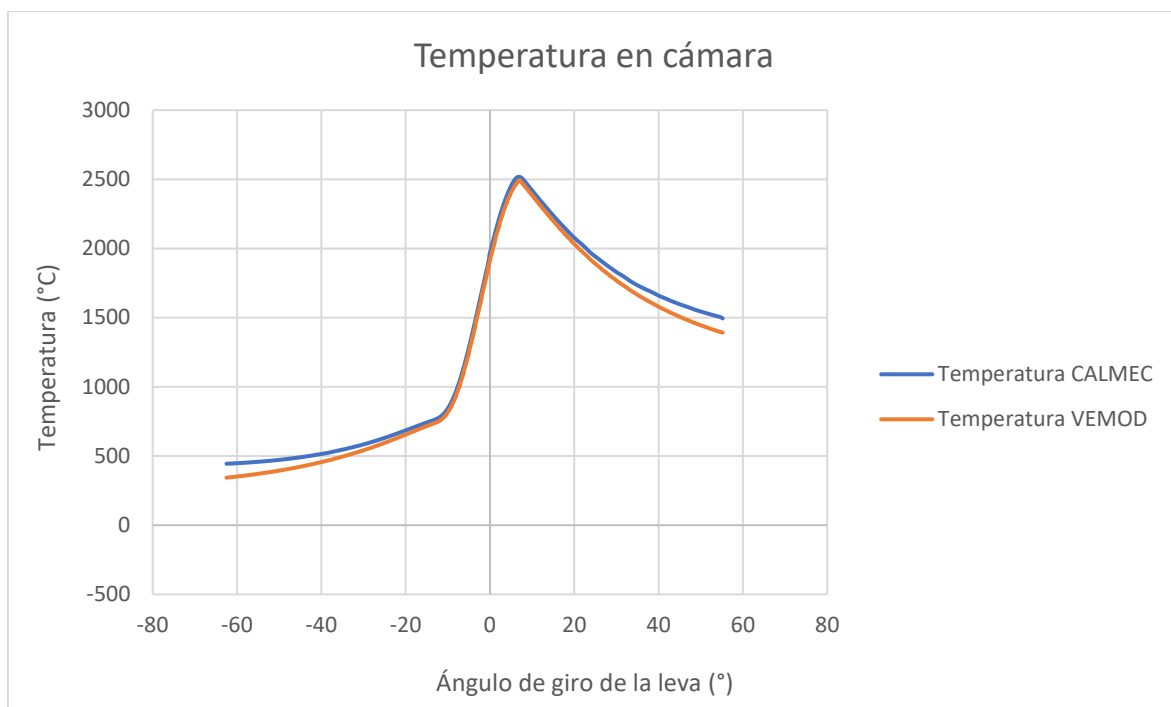


Figura 6.2.3. Temperatura en cámara durante el ciclo cerrado a 2000 rpm

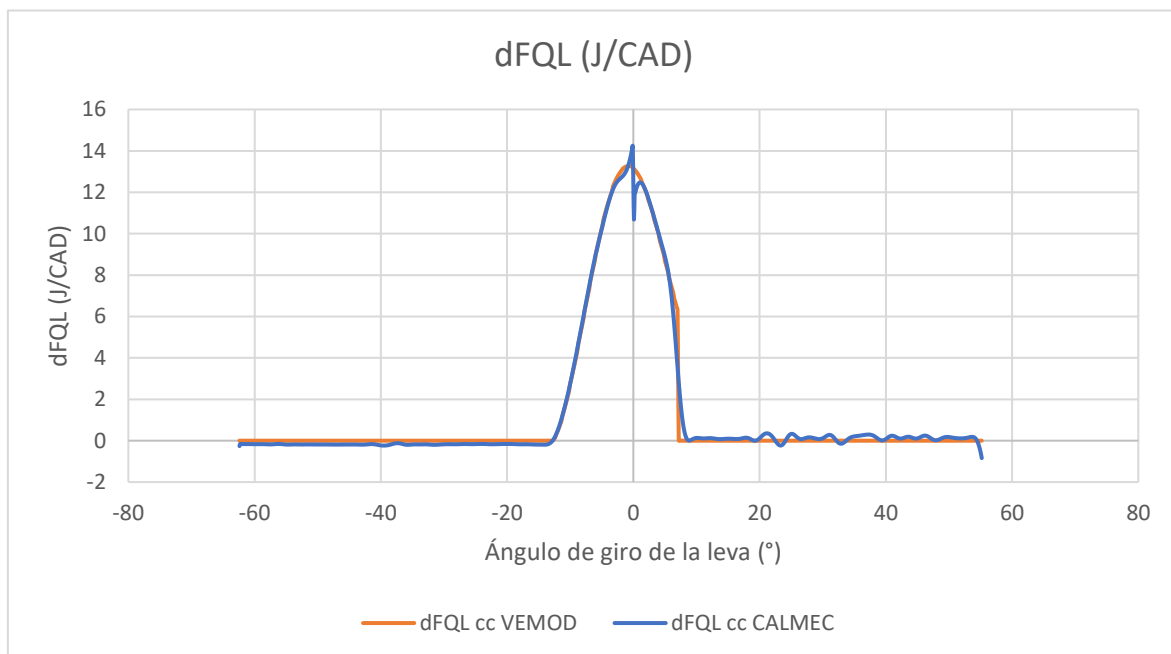


Figura 6.2.4 dFQL en el ciclo cerrado a 2000 rpm.

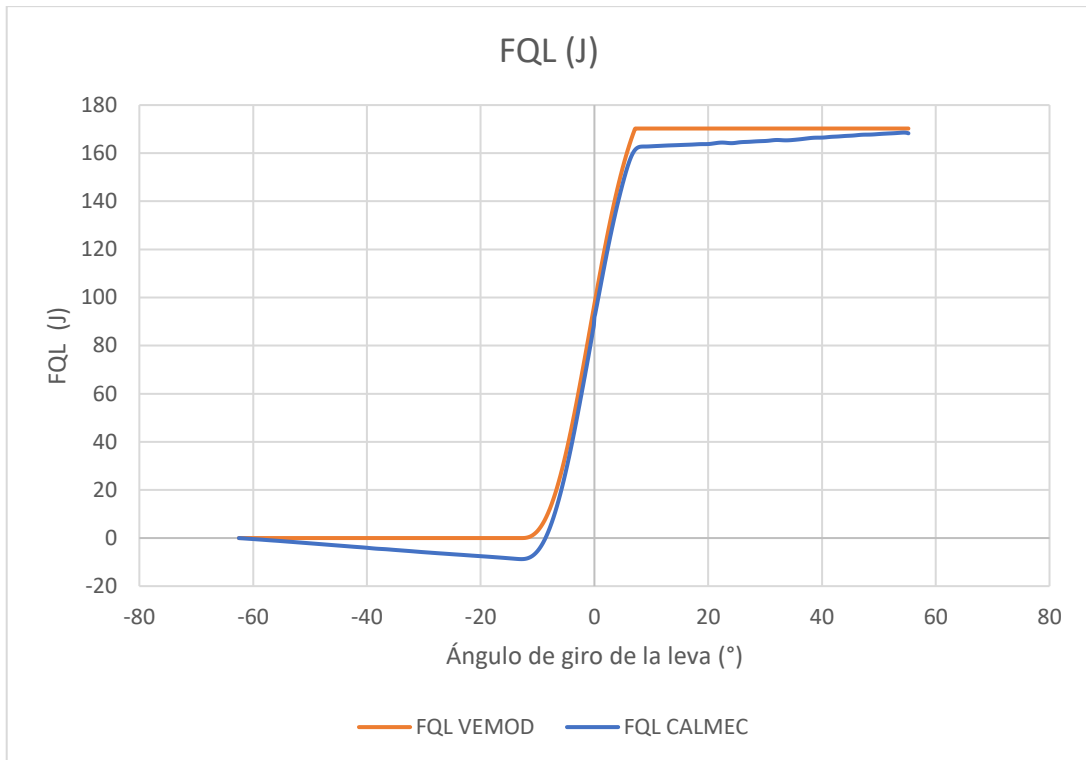


Figura 6.2.5 FQL en el ciclo cerrado a 2000 rpm

Obtenidos estos resultados, se rastrearon los posibles problemas que podrían estar afectando a estos cálculos. En primer lugar, se intentó solucionar el mayor problema, relacionado con la tasa de liberación de calor. Ésta, como ya se ha comentado en anteriores apartados, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$dFQL = du + dW + dQ + de_{bb} + de_{f,ev}$$

Con sus correspondientes términos ya explicados en este documento previamente. En el caso del estudio realizado en este proyecto, los términos de_{bb} y $de_{f,ev}$ son nulos. La primera es nula porque se considera nula la masa perdida por *blow-by*, al igual que lo hace el modelo de VEMOD. La segunda es nula porque se dispone de una versión del motor que funciona a gasolina, por lo que no perderemos energía por evaporación del combustible dentro del cilindro

Por lo tanto, el problema se encuentra entre los términos restantes. Comparando el trabajo resultante de las dos herramientas de diagnóstico, se observa que éste es correcto. Sin embargo, la transmisión de calor sí que presenta una notable diferencia. Por último, se intentó obtener la variación de energía interna que proporciona VEMOD, pero no fue posible.

Aunque no se pueda comparar la variación de energía interna, probablemente al solucionar la transmisión de calor se solucionarían la mayoría de los problemas ya que se observa una gran diferencia entre las transmisiones de calor obtenidas en las dos herramientas.

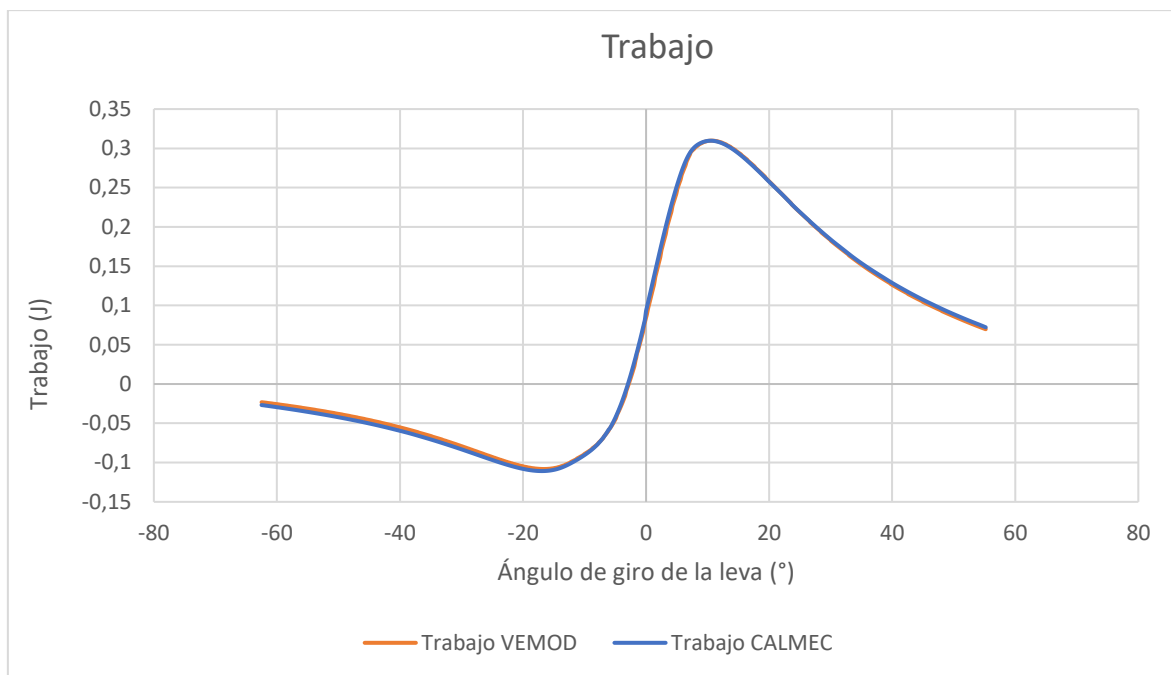


Figura 6.2.6. Trabajo del motor a lo largo del ciclo cerrado a 2000 rpm

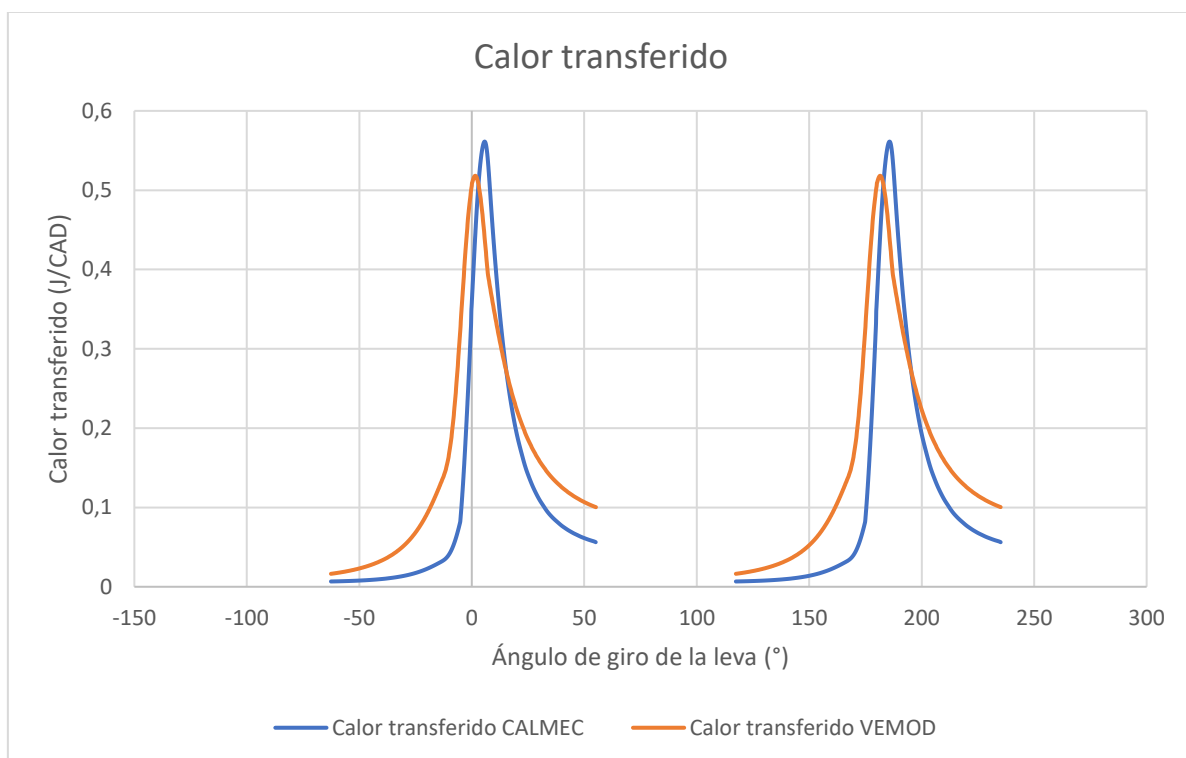


Figura 6.2.7. Calor transferido durante el ciclo cerrado desde los gases hacia los elementos físicos involucrados en la combustión a 2000 rpm

Al observar una diferencia tan significativa, se localizaron los posibles problemas que afectarían a esta discordancia. En primer lugar, se detectó que el modelo utilizado por VEMOD para calcular la transferencia de calor es el de Annand y no el de Woschni. Aunque esto no debería suponer un problema, sería más fácil encontrar los fallos si los dos funcionaran mediante el mismo modelo.

Se intentó configurar el modelo de VEMOD para que analizara este parámetro mediante el modelo de Woschni pero tras varios intentos se decidió dejarlo con su modelo original, ya que adaptar las dos herramientas queda fuera del alcance de este proyecto.

Tras analizar este parámetro solamente quedaba comprobar el calor específico (C_v), el exponente adiabático (γ), la constante de los gases ideales (R) y la composición del gas entrante en el cilindro.

Después de comparar estos valores y observar sus diferencias, se intentaron ajustar, imponiendo la composición al cierre y la temperatura de las paredes para que fueran todos los cálculos lo más similares a posibles a los realizados en VEMOD.

Una vez ajustados en la medida de lo posible los parámetros, no se observaron variaciones significativas en los resultados. Probablemente el mayor error se encuentre en el cálculo de la composición de combustible, ya que este parámetro, de entre los que hemos mencionado, es el que primero se calcula en *FCALMEC* y tiene influencia sobre el cálculo del resto.

Sin embargo, tras múltiples intentos y varias modificaciones del código, se ha decidido dejar el cálculo en la versión que resulta más ajustada a los resultados obtenidos en VEMOD.

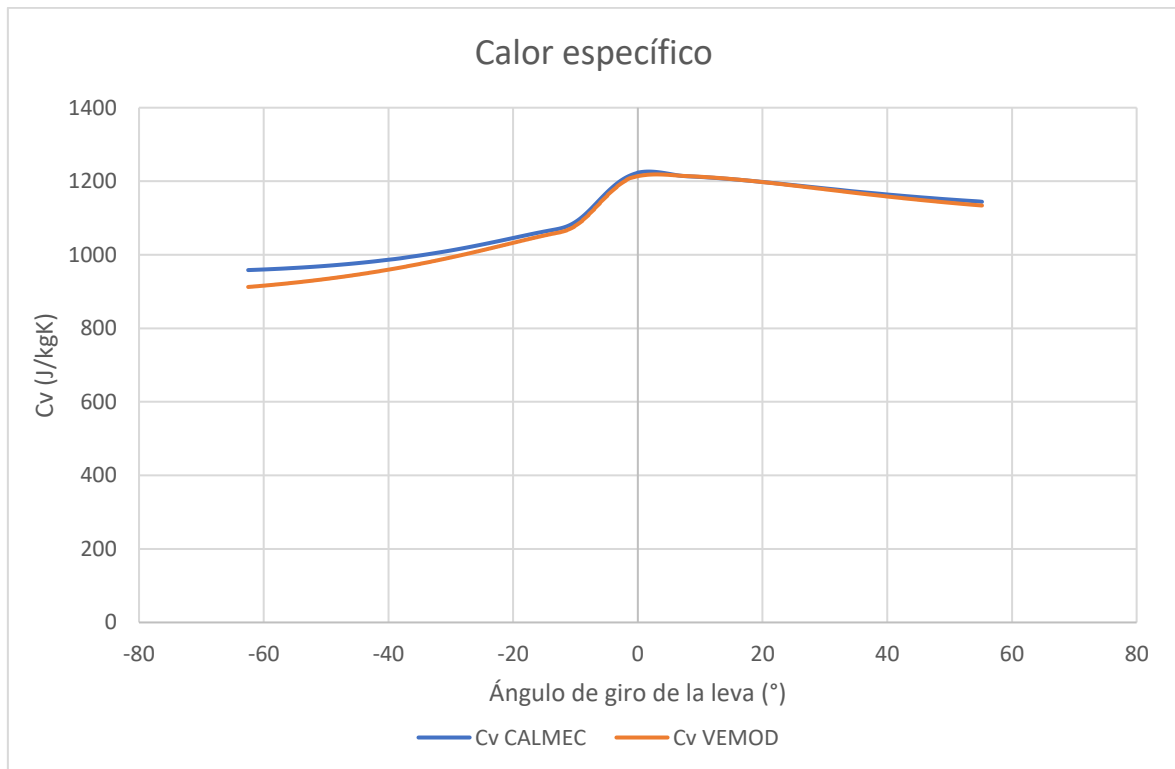


Figura 6.2.8. Calor específico durante el ciclo cerrado a 2000 rpm

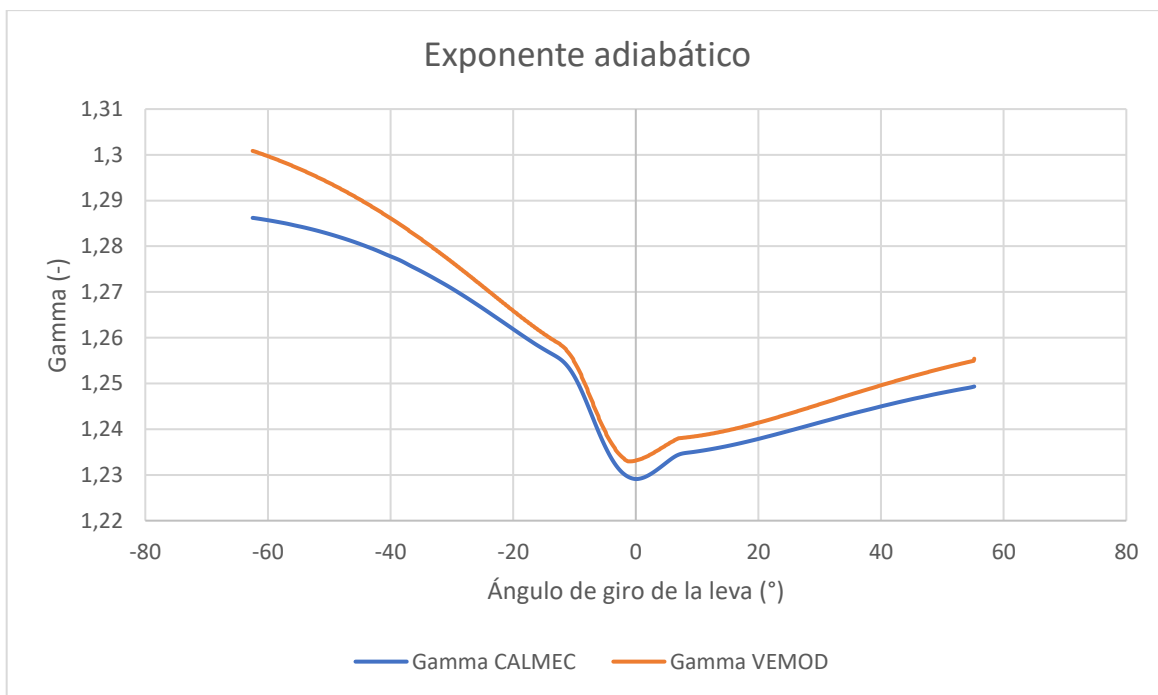


Figura 6.2.9. Exponente adiabático durante el ciclo cerrado a 2000 rpm



Figura 6.2.10 Constante de los gases ideales durante el ciclo cerrado a 2000 rpm

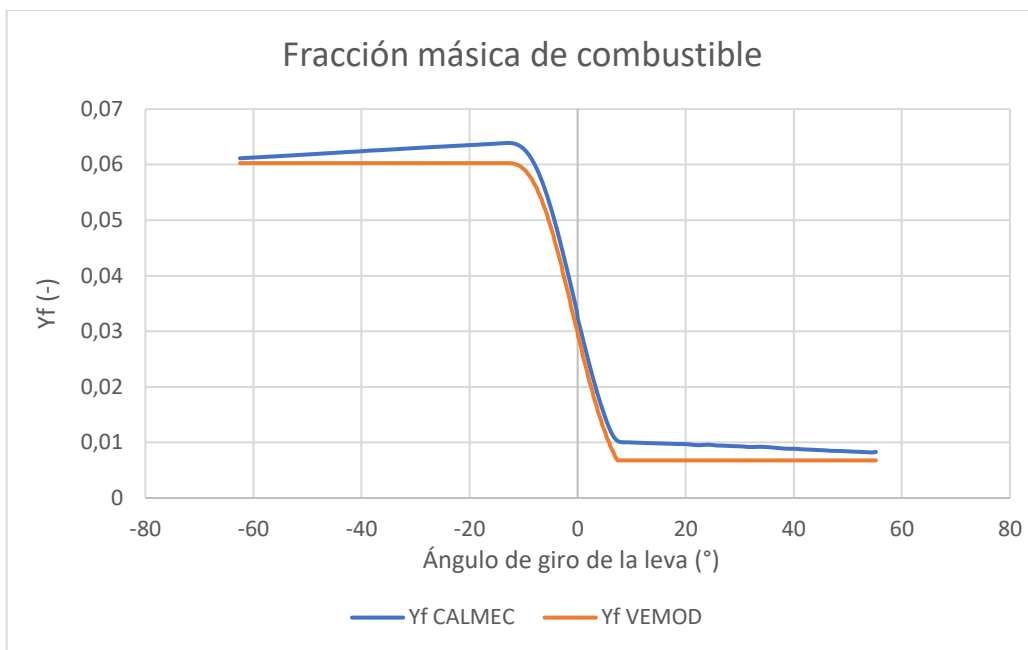


Figura 6.2.11. Fracción másica de combustible durante el ciclo cerrado a 2000 rpm

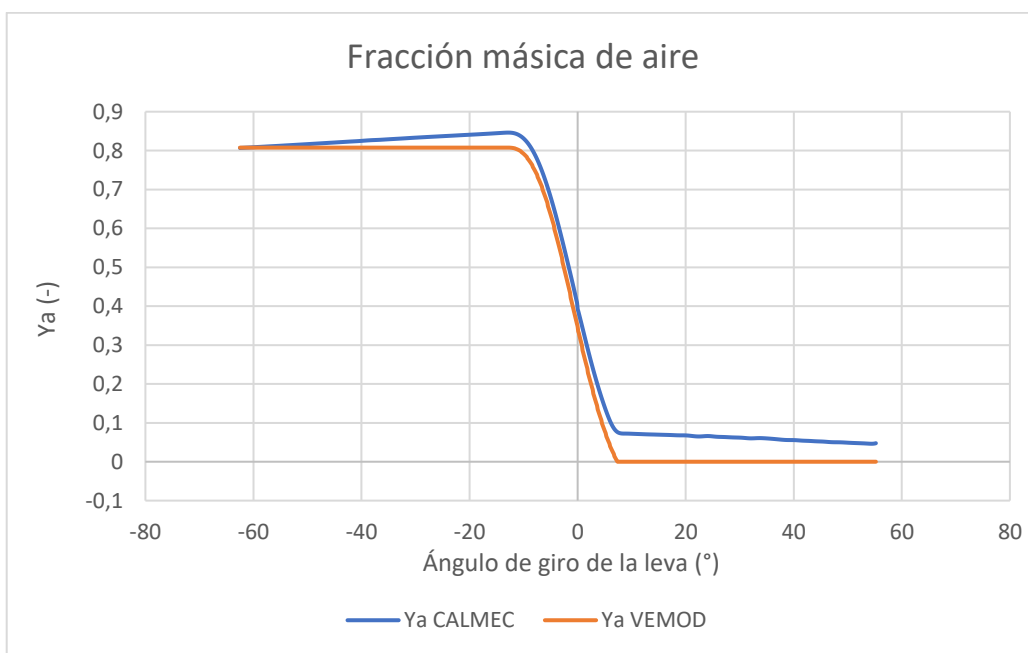


Figura 6.2.12. Fracción másica de aire durante el ciclo cerrado a 2000 rpm

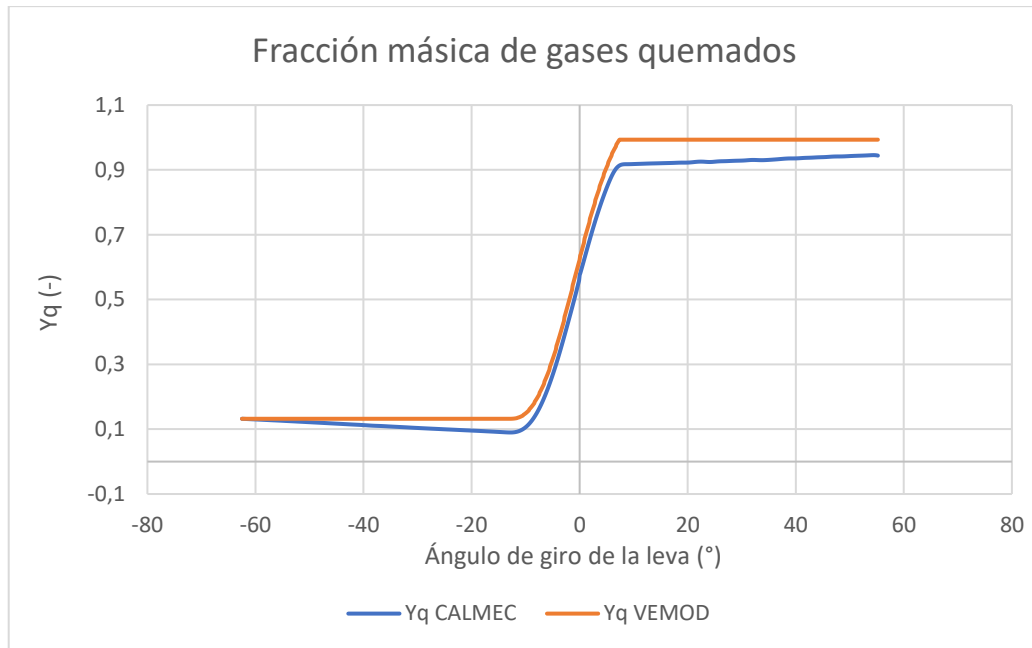


Figura 6.2.13. Fracción másica de gases quemados durante el ciclo cerrado a 2000 rpm

Como se observa en la figura 6.11, la cantidad de combustible aumenta durante la compresión en el ciclo cerrado, suceso que no debería ocurrir, éste debería permanecer constante ya que ambas lumbreras, de admisión y de escape permanecen cerradas en esta parte del ciclo del motor.

Debido a este problema, la herramienta obtiene valores negativos de la tasa de liberación de calor durante la compresión, como se ha descrito anteriormente en este apartado.

Además, la temperatura depende de la constante de los gases ideales, que también depende de la composición del fluido en el interior del cilindro. La temperatura afecta tanto al cálculo del calor transferido como al cálculo del calor específico, por lo que es muy importante que esté ajustada.

Durante la revisión del funcionamiento del código, se detecta que la composición de combustible empieza a calcularse con valores de $dFQL$ que presentan cierta incertidumbre, ya que presentan un valor negativo durante la compresión.

Probablemente, si se consiguiera ajustar el valor de la transmisión de calor, que es muy inferior a la que debería estar sucediendo en la cámara, se obtendría una $dFQL$ nula durante la compresión y los cálculos mejorarían notablemente, ya que el cálculo que se realiza para obtener la composición de combustible es correcto.

6.3. Validación de CALMEC en otros puntos de funcionamiento

Después de realizar el análisis en detalle del punto de funcionamiento a 2000 rpm, probable punto de funcionamiento del motor para su aplicación como *Range Extender* según el estudio de Galiana Amorós [2], se decidieron comprobar los resultados que obtenía CALMEC en otros puntos de funcionamiento.

Así, se lanzaron diversos casos a 1000, 2500, 3500 y 4000 revoluciones por minuto, y en todos ellos se observó un comportamiento similar, así que se incluirán en este apartado solamente los de 1000 y 3500 para que no se extienda demasiado, y en el anexo los de 2500 y 4000.

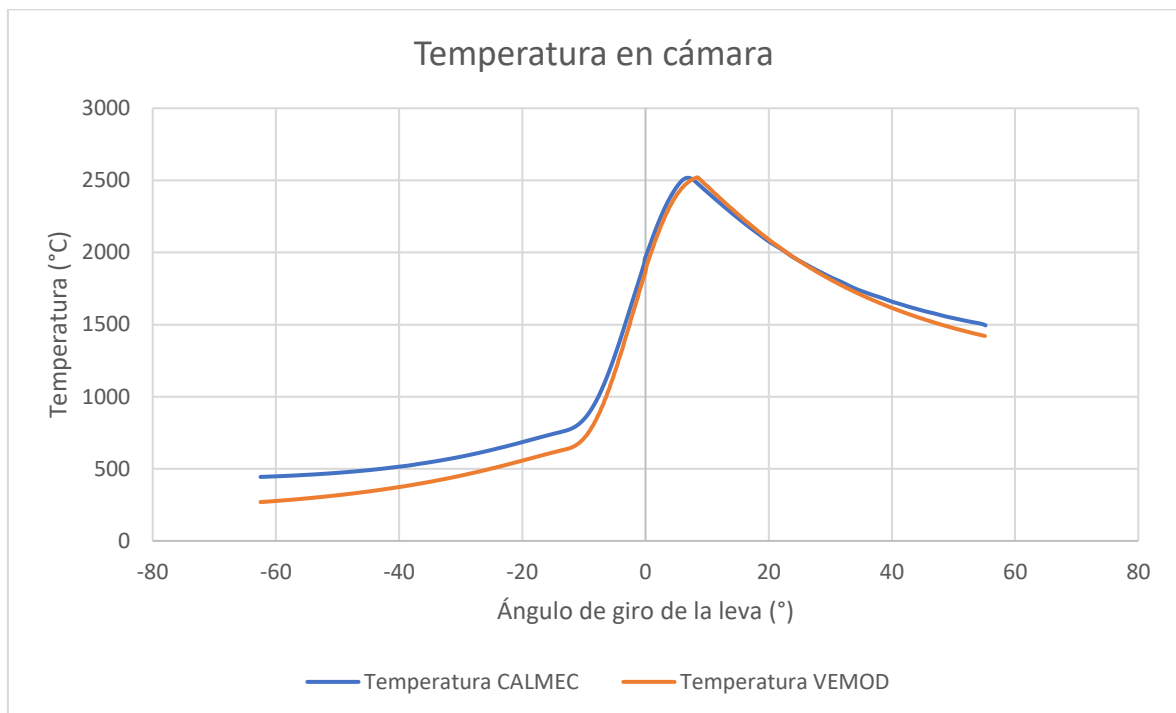


Figura 6.3.1. Temperatura en cámara durante el ciclo cerrado a 1000 rpm

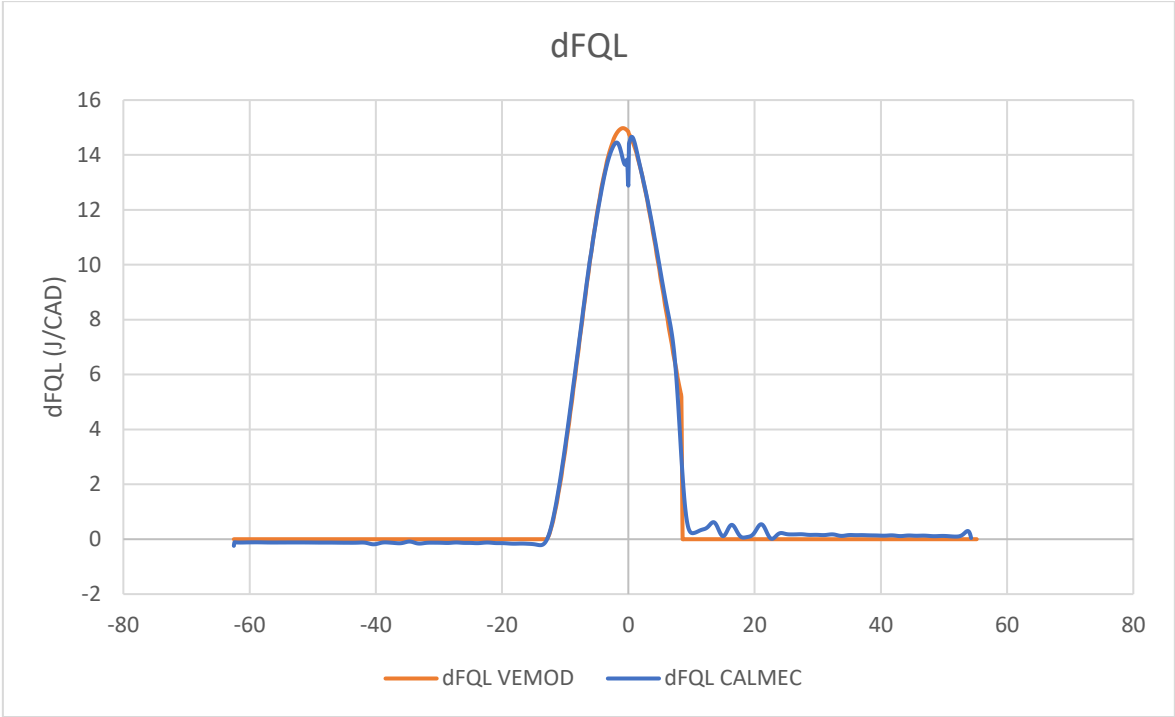


Figura 6.3.2 dFQL en el ciclo cerrado a 1000 rpm.

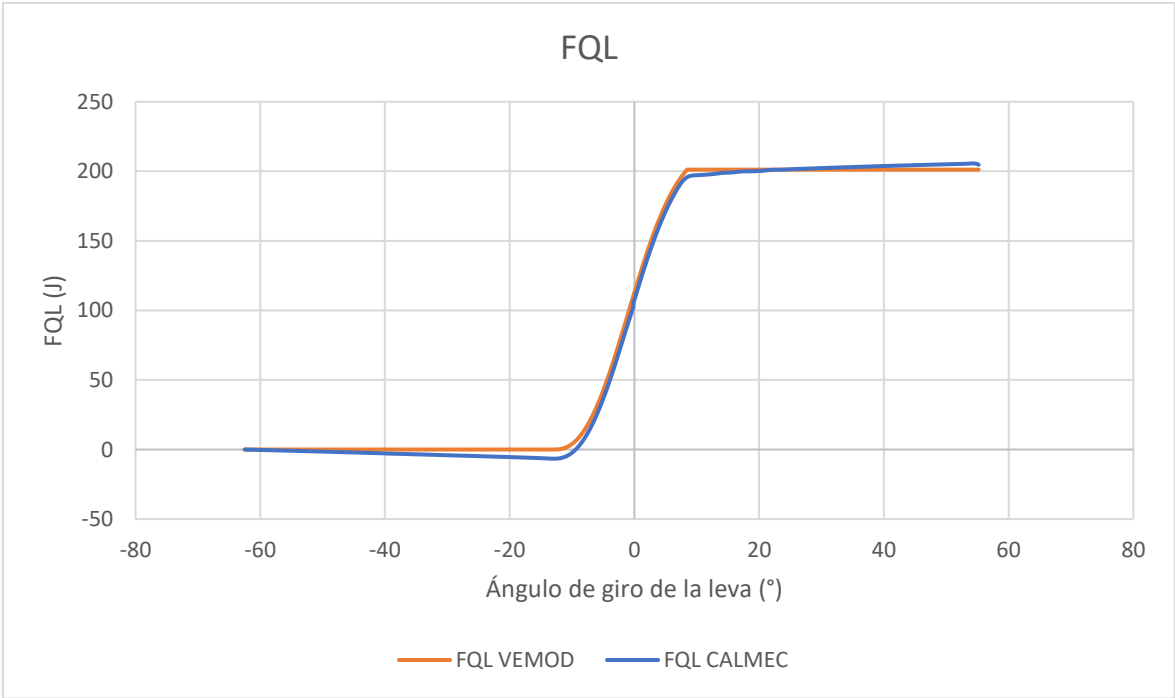


Figura 6.3.3. FQL en el ciclo cerrado a 1000 rpm.

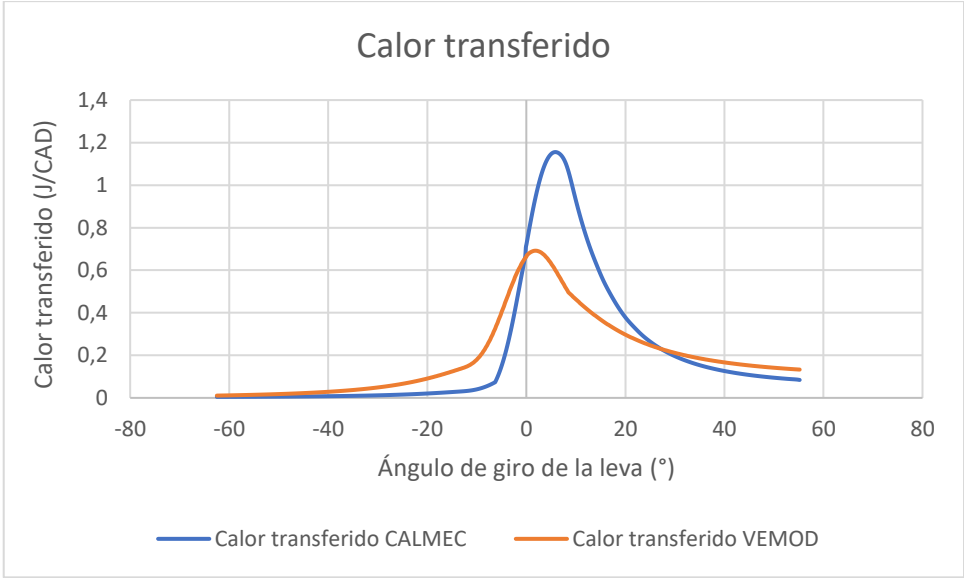


Figura 6.3.4. Calor transferido en el ciclo cerrado a 1000 rpm

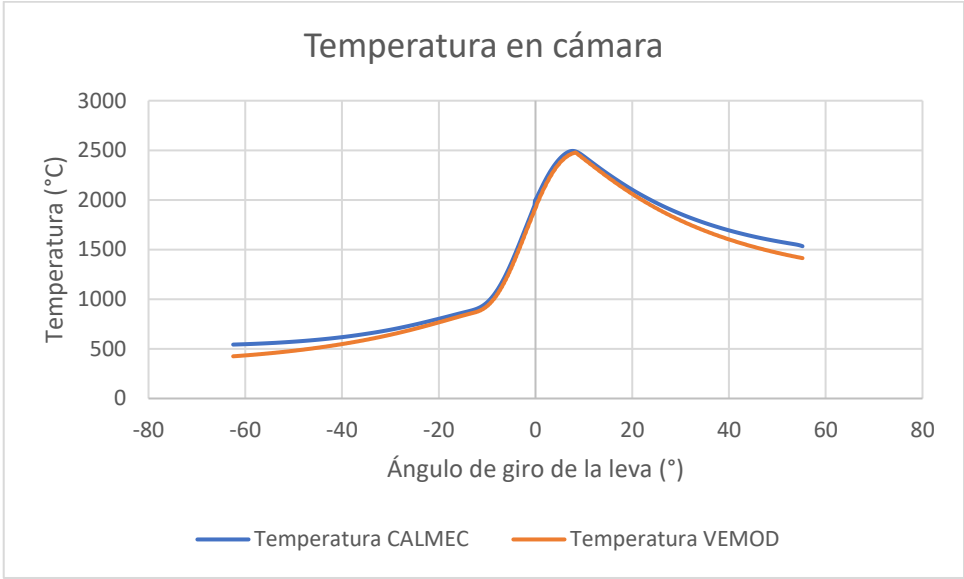


Figura 6.3.5. Temperatura en cámara durante el ciclo cerrado a 3500 rpm

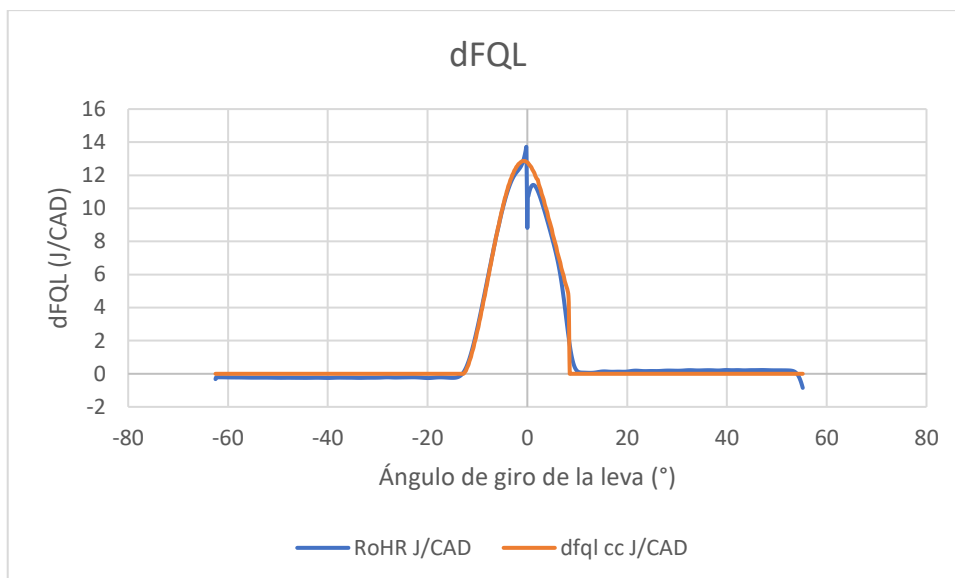


Figura 6.3.6 dFQL en el ciclo cerrado a 3500 rpm.

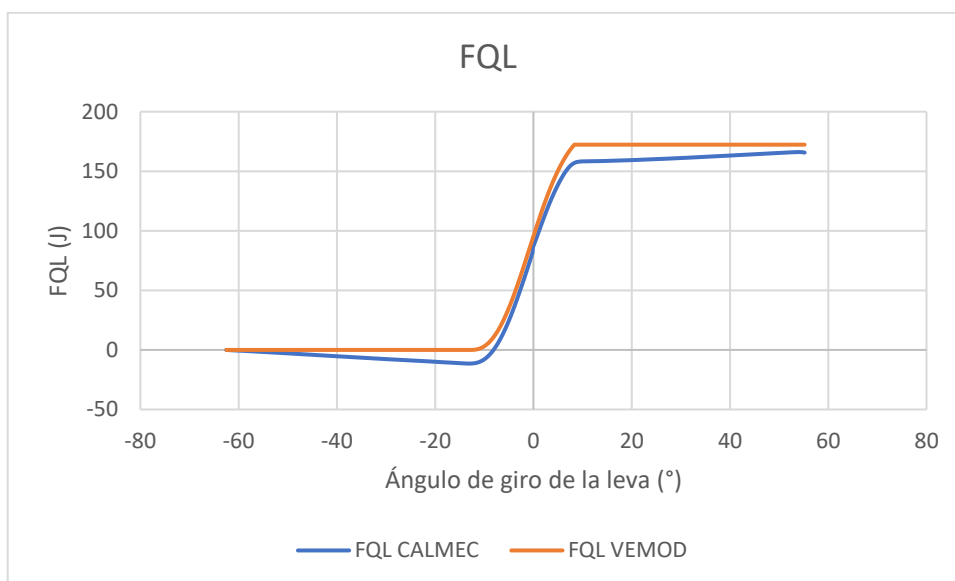


Figura 6.3.7 FQL en el ciclo cerrado a 3500 rpm.

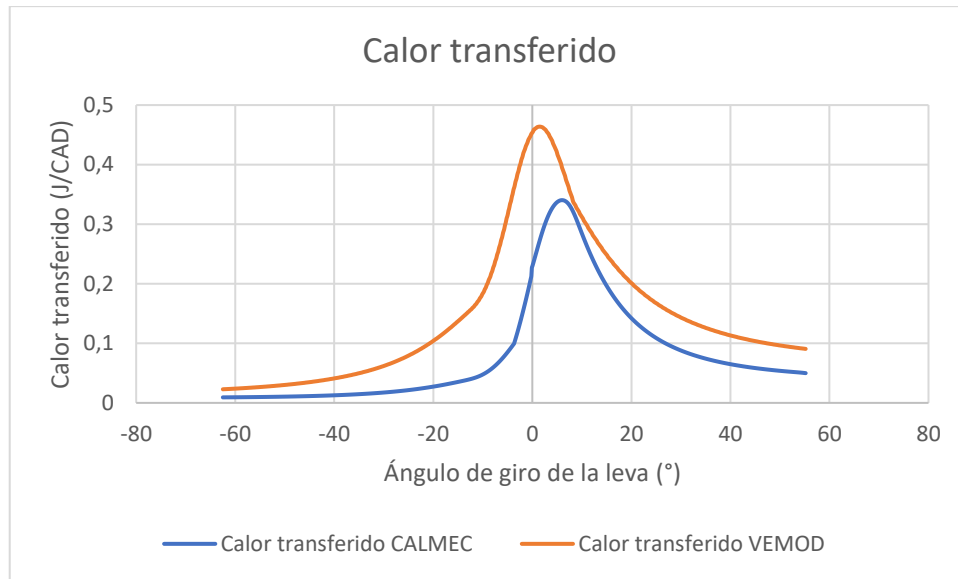


Figura 6.3.8 Calor transferido en el ciclo cerrado a 3500 rpm.

Las incertidumbres que se encuentran en estos ensayos son cualitativamente similares a los que ocurren en 2000 rpm, por lo tanto, solucionar los problemas de un punto, posiblemente solucionara las incertidumbres en todo el rango de funcionamiento

Como se observa, los mayores errores aparecen en el calor transferido, al igual que ocurre con el ensayo a 2000 rpm. Como ya se ha comentado en el punto 6.2. solucionar la incertidumbre de este cálculo probablemente permitiría resultados más ajustados entre ambas herramientas.

Sin embargo, el modelo de transmisión de calor de VEMOD no está completamente desarrollado, y completar este modelo, además de establecer en VEMOD la posibilidad de realizar este cálculo mediante el mismo modelo que CALMEC, el modelo de Woschni, queda lejos del alcance de este proyecto, cuyo objetivo es adaptar una herramienta de diagnóstico de la combustión, y no dos.

7. Conclusiones

7.1. Introducción

En este apartado se exponen las conclusiones obtenidas a partir de todo el desarrollo descrito en el presente documento, exponiendo además los objetivos cumplidos del proyecto, funcionalidad de la herramienta, y mejoras que deberían realizarse.

7.2. Herramienta CALMEC

Se ha logrado acondicionar la herramienta para que pueda analizar el motor de 1 tiempo de INNEngine. Sin embargo, los resultados no son perfectos, o al menos no lo son respecto a los datos proporcionados por VEMOD. Para confirmar el correcto funcionamiento del diagnóstico realizado mediante CALMEC sería adecuado compararlo con datos reales obtenidos en un ensayo de banco del motor.

Las modificaciones realizadas permitirán alterar parámetros del motor y comprobar su funcionamiento sin la necesidad de realizar ensayos en banco.

Como se observa en los resultados, algún cálculo es incorrecto para el motor INNEngine, probablemente el del calor transferido, en concreto en la etapa de compresión, donde el calor transferido es muy bajo, y como resultado, proporciona una tasa de liberación negativa, haciendo que otros cálculos dependientes de ésta queden desajustados e incluso incoherentes en algunos casos.

Aun teniendo estos problemas, se ha conseguido que la herramienta proporcione unos resultados admisibles a los que proporciona el modelo de VEMOD, por lo que mediante algunos ajustes debería ser capaz de estar a punto para analizar el motor sin problemas.

Sería necesario trabajar en la unificación de ambos modelos, pero queda fuera de este proyecto modificar el funcionamiento del modelo de VEMOD.

7.3 Futuros proyectos

Sería adecuado comprobar que el cálculo realizado en modelo de transmisión de calor empleado por CALMEC es adecuado para el motor INNEngine, ya que probablemente en ese cálculo se encuentra el origen de la mayoría de los problemas que suceden en la etapa de combustión.

Por otro lado, el modelo de transmisión de calor del modelo virtual de VEMOD debería ser revisado para comprobar si el programa que falla es el de CALMEC o el de VEMOD, además de intentar implementar el modelo de Woschni con el fin de poder comparar adecuadamente los resultados de ambas herramientas.

Además, hay diversas variables, como la variación de energía interna, que el modelo de VEMOD no proporciona y serían de gran ayuda para detectar errores cometidos en la configuración de la herramienta de diagnóstico en CALMEC.

Por último, la herramienta diseñada debería compararse con datos reales medidos en un banco de ensayo para confirmar su precisión y poder arreglar parámetros que no estén siendo calculados de forma adecuada en CALMEC.

Bibliografía

- [1] Martín Díaz, J. (2007). *Aportación al diagnóstico de la combustión*. Tesis doctoral. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [2] Galiana Amorós, J.L. (2019) *Análisis de un motor novedoso de pistones opuesto para su utilización como Range Extender*. Trabajo Fin de Grado. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [3] Juan Francisco Calero – Club Onmotor, “El nuevo motor de INNEngine al desnudo: Desde Granada, todo lo que necesitas saber ¿Es revolucionario?”, en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=r5LfAZB0TtU>> [Consulta: 20 de mayo de 2020].
- [4] Juan Francisco Calero – Club Onmotor, “Tercer grado al motor INNEngine: más datos; imágenes, respuestas y... ¡Todo lo que queda por saber!”, en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=BIvmlwEnNdY>> [Consulta: 20 de mayo de 2020].
- [5] Martín, J., Arnau, F., Piqueras, P. y Auñón, A. (2018). *Development of Integrated Virtual Engine Model to Simulate New Standard Testing Cycles*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [6] Bondía Romero, L. (2019). *Modelado de ciclos de homologación mediante un motor virtual*. Trabajo Fin de Máster. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [7] Cano Bernet, J. (2019). *Análisis del funcionamiento de un motor de encendido provocado TJI mediante una herramienta de diagnóstico de la combustión*. Trabajo Fin de Grado. Universidad Politécnica de Valencia.
- [8] Woschni, G. (1967) *A universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine*. SAE Paper 670931
- [9] Armas, O. (1998) *Diagnóstico experimental del proceso de combustión en motores Diesel de inyección directa*. Tesis doctoral, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [10] Página Web de la empresa INNEngine <http://innengine.com/>
- [11] Juan Garrido Requena INNEngine, “INNEngine M500_4C 2019”, en Youtube <<https://www.youtube.com/watch?v=aovQguKPG4A>> [Consulta: 25 de febrero de 2020]

Parte II

Presupuesto

1. Presupuesto

1.1. Introducción

El presupuesto de este proyecto se ha dividido en dos partes. En primer lugar, los costes de la mano de obra debidos al tiempo empleado en la realización del diseño de la herramienta de diagnóstico de la combustión y a la validación de sus resultados. En segundo lugar, los costes del material y las herramientas de cálculo empleadas.

1.2. Coste de la mano de obra

Este coste es debido al personal que ha colaborado en la creación y desarrollo de este proyecto. Si se tiene en cuenta que este proyecto se ha realizado mediante simulaciones por ordenador en su totalidad, es de esperar que la mayor parte de los costes se encuentre en este apartado.

El tiempo dedicado a este trabajo es teóricamente de 12 créditos, lo que equivale a 300 horas dedicadas por parte del alumno. Sin embargo, el CMT tiene un programa becado que abarca tanto prácticas de empresa como TFG, y la suma de estas dos materias a superar por el alumno resulta en 25,5 créditos, el equivalente a 637.5 horas.

Se estiman en torno a 500 horas al proyecto descrito en este documento. El alumno que se ha dedicado a la realización de éste se considera como un ingeniero industrial a la hora de establecer su coste.

El personal que ha participado en este proyecto ha sido:

- Un estudiante de grado de ingeniería industrial, considerado en los costes como un ingeniero industrial en prácticas. Con un coste de 20 €/hora
- Un docente de la universidad, director y tutor del proyecto y las prácticas de empresa. Con un coste de 65€/hora

Durante el desarrollo de este proyecto se han realizado las siguientes tareas:

- Adaptación de la herramienta CALMEC para poder analizar el motor INNEngine
- Modificación de parámetros de entrada en la interfaz de Excel que eran erróneos
- Análisis de los resultados
- Validación del correcto funcionamiento de la herramienta

Teniendo en cuenta los recursos humanos mencionados se obtiene la siguiente tabla:

Ref.	Descripción	Uds.	Cantidad	Coste unitario (€/Uds.)	Importe (€)
1.1	Titular Universidad	h	50	65	3250
1.2	Ingeniero industrial	h	500	20	10000
Coste total de los recursos humanos					13250

Tabla 1.1: Coste total de la mano de obra

1.3. Coste de equipos y herramientas

Para el cálculo del coste de los equipos y herramientas se calculará su amortización y su computo se realizará de la siguiente forma:

$$a = \frac{V_A - V_D}{n}$$

Siendo:

- a la amortización (€/año)
- V_A el valor de adquisición
- V_D el valor de deshecho
- n el número de años del periodo de amortización

Se establece un valor residual del 20% del precio inicial de compra. Además, a partir de la amortización, se va a establecer la tasa horaria de cada equipo como:

$$t_h = \frac{a}{h}$$

Siendo:

- a la amortización (€/año)
- h las horas de funcionamiento anuales del equipo o herramienta empleado.

Siendo las horas de funcionamiento anuales 1575, cálculo obtenido al multiplicar el número total de días laborables (365 – 30 días de vacaciones – 96 de fines de semana – 14 de festivos nacionales y locales) por el número de horas diarias que se realizan en el CMT (7 h diarias, 35 h semanales).

Así, se encuentran los siguientes costes unitarios:

- Ordenador proporcionado por el CMT

$$a = \frac{V_A - V_D}{n} = \frac{800 - 160}{8} = 80 \text{ €/año}$$

$$t_h = \frac{a}{h} = \frac{80}{h} = \frac{80}{1575} = 0.0508 \text{ €/h}$$

- Licencia Matlab

$$t_h = \frac{800}{1575} = 0.508 \text{ €/h}$$

- Licencia Microsoft Office 365

$$t_h = \frac{69}{1575} = 0.0438 \text{ €/h}$$

- Licencia de VEMOD

Este programa está desarrollado por el propio, CMT, por lo que no supone un coste para el proyecto.

De esta manera, el coste total de los equipos y herramientas asciende a:

Ref.	Descripción	Uds.	Cantidad	Coste unitario (€/Uds.)	Importe (€)
2.1	Ordenador CMT	h	500	0.0508	25.4
2.2	Licencia Matlab	h	500	0.508	254
2.3	Licencia Office 365	h	500	0.0438	21.9
Coste total de los equipos y herramientas					301.3

Tabla 1.2 Coste total de equipos y herramientas

1.4. Presupuesto total

Por último, en la siguiente tabla se encuentra el presupuesto total del proyecto, en el que se ha incluido el IVA, los gastos generales y el beneficio industrial.

Descripción	Importe (€)
Coste de la mano de obra	13250
Coste de equipos y herramientas	301.3
	13551.3
Gastos generales (13%)	1761
Beneficio industrial (6%)	813.078
	16125.38
IVA (21%)	3386.33
TOTAL	19511.71

Tabla 1.3 Coste total del proyecto

El coste total de este proyecto asciende a:

DIECINUEVE MIL QUINIENTOS ONCE EUROS CON SETENTA Y UN CÉNTIMOS

Anexo

A.1. Líneas de código comentadas en 5.2

```

%%INNENGINE
if Engine.Main.NOS == 1
    ang_PMI=90;
    if Engine.VT.AAA >= Engine.VT.AAE
        FirstOpening = Engine.VT.AAA;
    else %AAA < AAE
        FirstOpening = Engine.VT.AAE;
    end
    if Engine.VT.RCA >= Engine.VT.RCE
        LastClosing = Engine.VT.RCA;
    else %RCA < AAE
        LastClosing = Engine.VT.RCE;
    end
    Engine.VT.FirstOpening=FirstOpening;
    Engine.VT.LastClosing=LastClosing;
else
    ang_PMI=180;
    FirstOpening = Engine.VT.AAE;
    LastClosing = Engine.VT.RCA;
end

```

Figura A.1 Determinación de Last Closing y First Opening

```

if Engine.Main.NOS==1 %INNEngine
    if ind_TDC <= ang_PMI/delta_ang % If the angle is split
        ind_BDC = ind_TDC + ang_PMI/delta_ang; % Find the BDC angle
    else
        ind_BDC = ind_TDC -ang_PMI/delta_ang; % Find the BDC angle
    end
else
    if ind_TDC <= 180/delta_ang % If the angle is split
        ind_BDC = ind_TDC + 540/delta_ang; % Find the BDC angle
    else
        ind_BDC = ind_TDC -180/delta_ang; % Find the BDC angle
    end
end
end

```

Figura A.2 Localización del PMI a partir del PMS

A.2. Líneas de código comentadas en 5.3

```

function [Engine] = modvolINNEngine(Engine,ang)
%Interpolación para calcular los valores del volumen según el vector de
%ángulos que tengamos%
global CGradosCiclo
ang0=Engine.Main.INNEngineVol(:,1);
vol=Engine.Main.INNEngineVol(:,4);
while (ang(1,1)<0)
ang=ang+CGradosCiclo;
end
for i=1:length(ang)
if ang(i,1)>=CGradosCiclo
ang(i,1)=ang(i,1)-CGradosCiclo;
end
end
for i=1:length(ang)
Engine.VT.volinterp(i,1)=ang(i,1);
Engine.VT.volinterp(i,2)=interp1(ang0,vol,ang(i,1));
end
end
end

```

Figura A.3. Interpolación del volumen en función del vector de ángulos

```

function [EngineVol] = Volumen_INNEngine()
%Function that calculates the in-cylinders volume depending on the Cam
%Phasing and on the angle of rotation
ang = xlsread('D:\Mathis\Calmec Matlab debug\Inputs\InputsInnengine\Configuration\INNEngine.xlsx','B3:B1803');
VolAdm = xlsread('D:\Mathis\Calmec Matlab debug\Inputs\InputsInnengine\Configuration\INNEngine.xlsx','C3:C1803');
VolEsc = xlsread('D:\Mathis\Calmec Matlab debug\Inputs\InputsInnengine\Configuration\INNEngine.xlsx','D3:D1803');
CP = xlsread('D:\Mathis\Calmec Matlab debug\Inputs\InputsInnengine\Configuration\INNEngine.xlsx','Engine','B154'); % CP = Cam Phasing

%% Create an array of the volume depending on the actuator
M=1; VOL=0;
for N=(1:(length(ang)-CP*10)) % N = Angle*10
VOL(N) = VolEsc(N+CP*10);
N = N+1;
end
for N=((length(ang)-CP*10+1):length(ang))
VOL(N) = VolEsc(M);
M = M+1;
N = N+1;
end

VolEscAct=VOL'; % Volume Exhaust depending on the Actuator
Volume2piston = VolAdm+VolEscAct;

```

Figura A.4. Lectura y ordenación del volumen según el Cam Phasing

A.3. Ensayos a 2500 y 4000 rpm

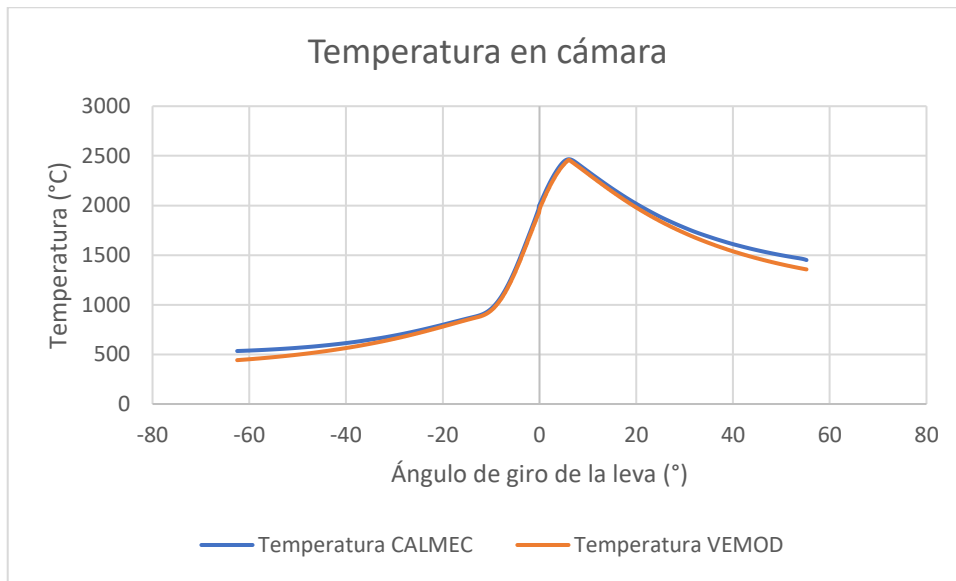


Figura A.5. Temperatura en cámara durante el ciclo cerrado a 2500 rpm

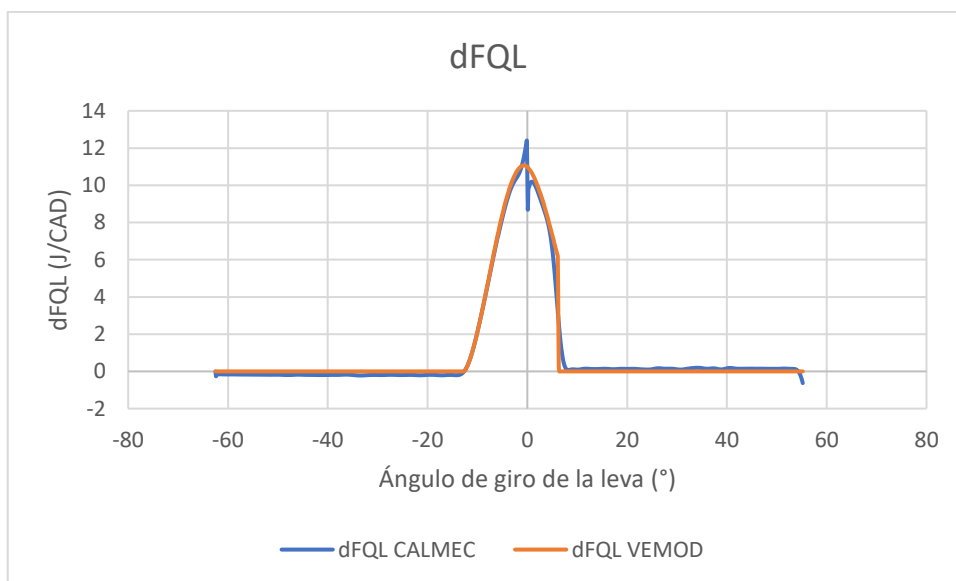


Figura A.6. dFQL en el ciclo cerrado a 2500 rpm.

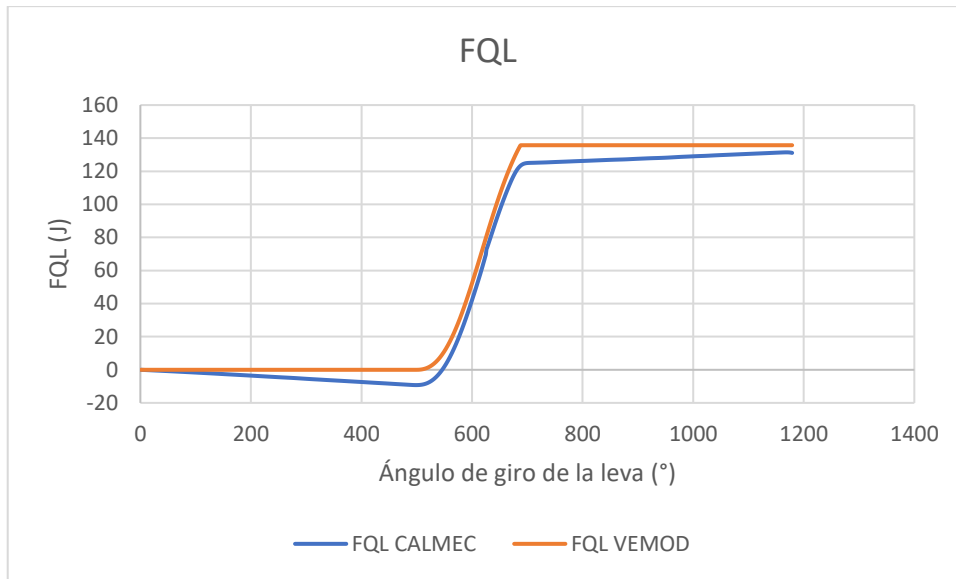


Figura A.7. FQL en el ciclo cerrado a 2500 rpm.

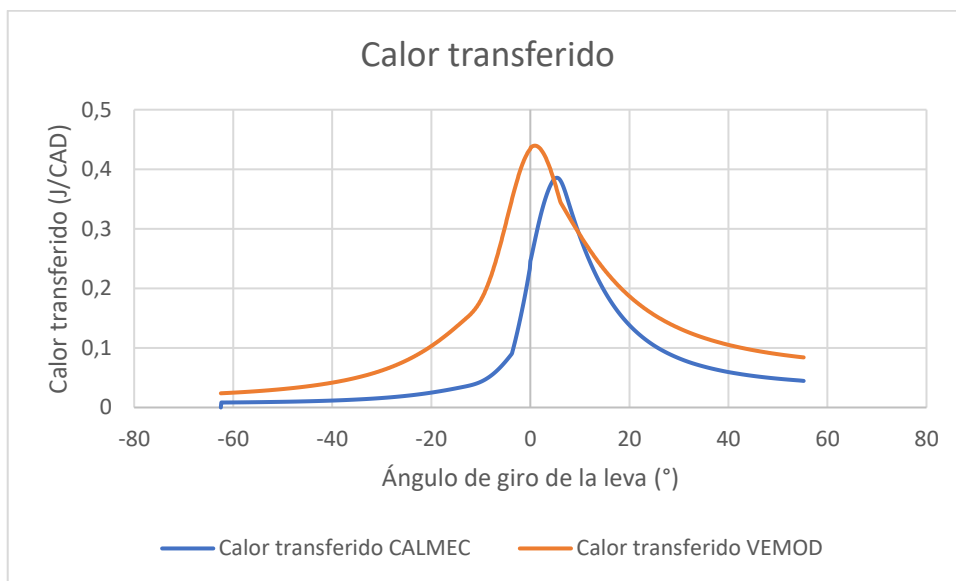


Figura A.8. Calor transferido en el ciclo cerrado a 2500 rpm.

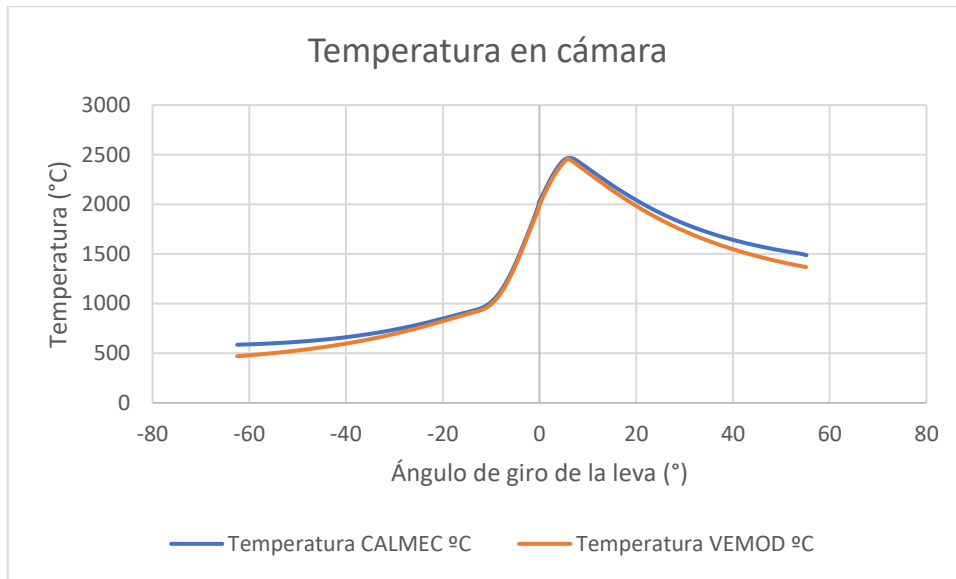


Figura A.9. Temperatura en cámara durante el ciclo cerrado a 4000 rpm

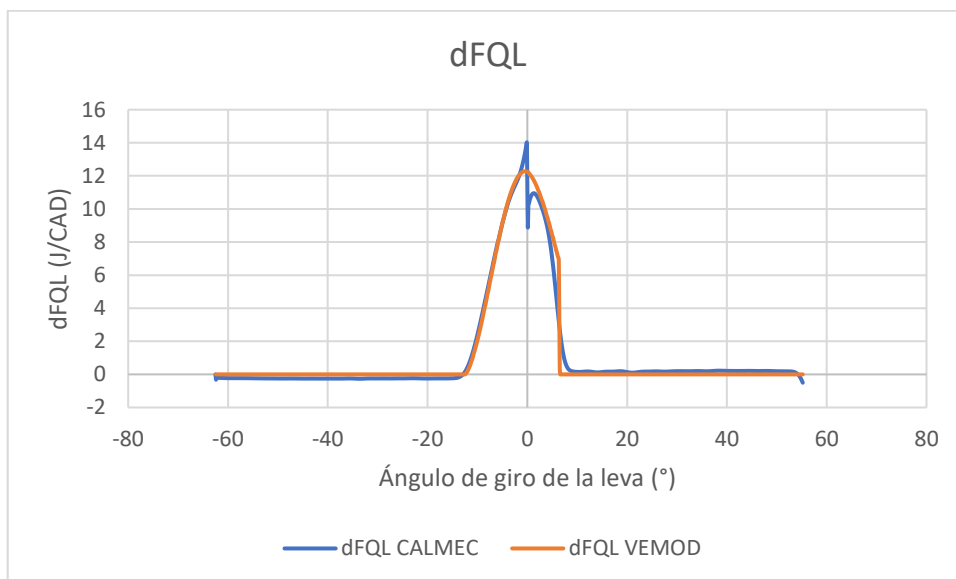


Figura A.10. dFQL en el ciclo cerrado a 4000 rpm.

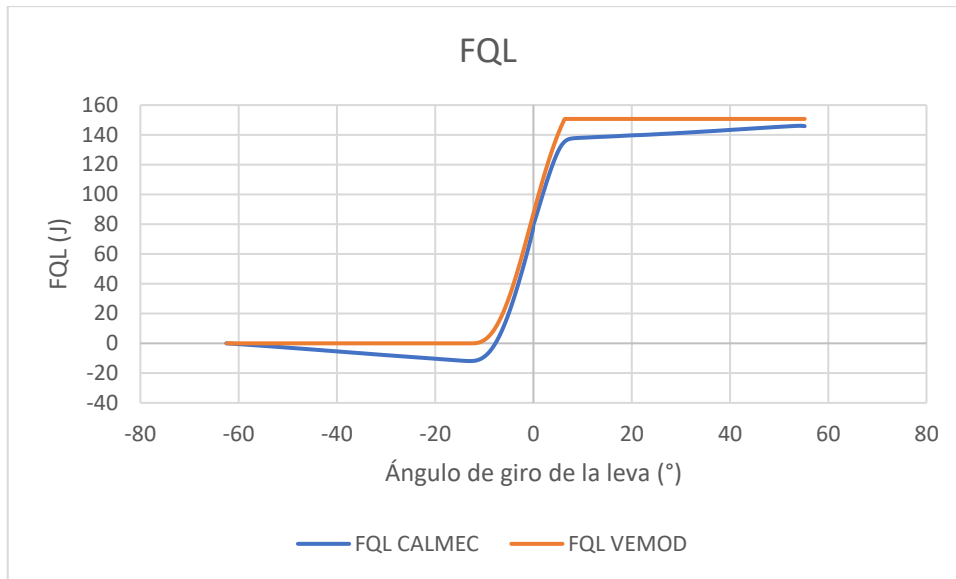


Figura A.11. FQL en el ciclo cerrado a 4000 rpm.

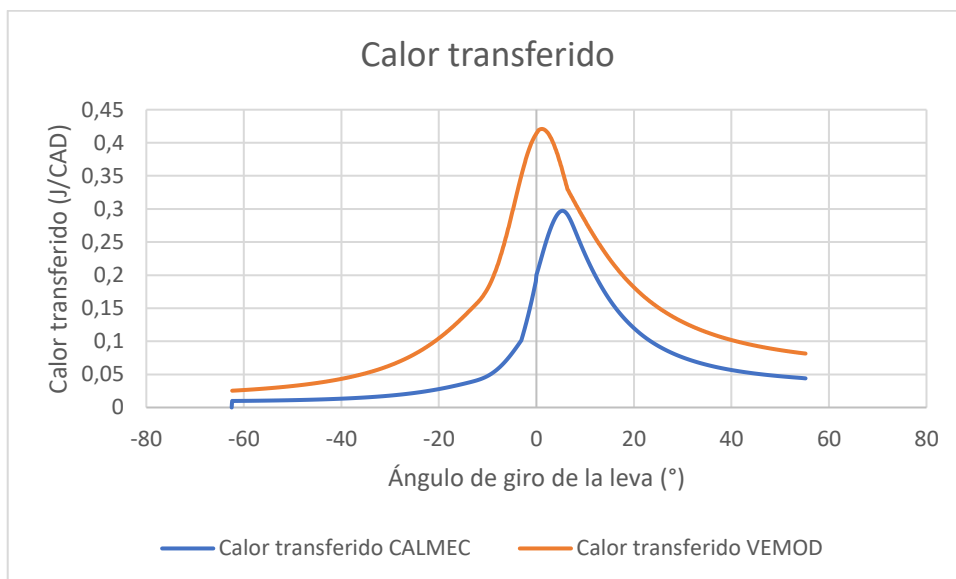


Figura A.12. Calor transferido en el ciclo cerrado a 4000 rpm.