



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

APLICACIÓN DE UN MODELO DE DIAGNÓSTICO DE LA COMBUSTIÓN PARA LA DETECCIÓN DE LA DISPERSIÓN DE EGR EN UN MOTOR DIESEL EURO5

AUTOR: DAVID AÑÓN GARCÍA

TUTOR: JOSÉ MANUEL LUJÁN MARTÍNEZ

Curso Académico: 2013-14

Índice

I MEMORIA	5
1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Antecedentes	5
1.2. Objetivo	7
2. METODOLOGÍA	8
2.1. Condiciones de Referencia	8
2.2. Estudio Paramétrico	8
2.3. Configuraciones de Admisión	9
2.4. Resumen	9
3. INSTALACIONES	10
3.1. Sala de Ensayos	10
3.1.1. <i>Localización</i>	10
3.1.2. <i>Descripción general</i>	10
3.2. Instalación del Bloque Motor	12
3.2.1. <i>Motor</i>	12
3.2.2. <i>Bancada</i>	14
3.2.3. <i>Freno dinamométrico</i>	16
3.3. Instrumentación de Medida	16
3.3.1. <i>Condiciones de trabajo</i>	16
3.3.2. <i>Parámetros de motor</i>	18
3.3.3. <i>Contaminantes</i>	18
3.3.4. <i>Configuraciones LP/HP</i>	19
3.4. Sala de Control	21
4. ENSAYOS	22
4.1. Estacionario C	22
4.2. Tipos de Ensayo	22
4.3. Cambio de LP a HP en Estacionario	23
4.4. Temperatura de Admisión	24
5. MODELO TEÓRICO DE COMBUSTIÓN	25
5.1. Hipótesis	25
5.2. Determinación de la Ley de Calor	25
5.2.1. <i>Fracción de calor liberado</i>	26
5.3. Comienzo y Final de la Combustión	27

5.3.1. <i>Inicio y final de la combustión</i>	27
5.3.2. <i>Otros parámetros de la combustión</i>	28
5.4. Sobre CALMEC	29
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	30
6.1. Referencia	30
6.2. Variación del Porcentaje de EGR en Cada Cilindro	31
7. CONCLUSIONES	33
II PLIEGO DE CONDICIONES	35
1. GENERAL	35
1.1. Seguridad e higiene	35
1.2. Motor y Equipos	36
1.2.1. <i>Motor</i>	36
1.2.2. <i>Adquisición de datos</i>	36
2. ENSAYOS	37
2.1. Montaje de Placa de Admisión	37
2.1.1. <i>Listado de ensayos a realizar</i>	37
2.2. Estabilización del Motor	37
2.3. Punto de Funcionamiento	37
2.4. Cambio de EGR LP a EGR HP	38
III PRESUPUESTO	39
1. FUNGIBLES	39
2. AMORTIZACIÓN	39
3. PERSONAL	40
4. PRESUPUESTO TOTAL	41
IV ANEJO	42
1. PLACA NO OPTIMIZADA	42
1.1. Condiciones de Ensayo y Parámetros de Combustión	42
1.2. Comparativa Global de LP y HP	43

1.2.1.	<i>Temperatura en los cuatro cilindros:</i>	43
1.2.2.	<i>Presión en los cuatro cilindros:</i>	44
1.3.	Comparativa LP/HP por Cilindro	45
1.3.1.	<i>Temperatura:</i>	45
1.3.2.	<i>Presión:</i>	47
1.3.3.	<i>FQL/DFQL:</i>	49
2.	PLACA OPTIMIZADA	51
2.1.	Condiciones de Ensayo y Parámetros de Combustión	51
2.2.	Comparativa Global EGR LP y HP	52
2.2.1.	<i>Temperatura en los cuatro cilindros:</i>	52
2.2.2.	<i>Presión en los cuatro cilindros:</i>	53
2.3.	Comparativa LP/HP por Cilindro	54
2.3.1.	<i>Temperatura:</i>	54
2.3.2.	<i>Presión:</i>	56
2.3.3.	<i>FQL/DFQL:</i>	58
3.	ADMISIÓN SIN PLACA	60
3.1.	Condiciones de Ensayo y Parámetros de Combustión	60
3.2.	Comparativa Global EGR LP y HP	61
3.2.1.	<i>Temperatura en los cuatro cilindros:</i>	61
3.2.2.	<i>Presión en los cuatro cilindros:</i>	62
3.3.	Comparativa LP/HP por Cilindro	63
3.3.1.	<i>Temperatura:</i>	63
3.3.2.	<i>Presión:</i>	65
3.3.3.	<i>FQL/DFQL:</i>	67

Parte I

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

- Motores de Combustión Interna Alternativos:

Los motores de combustión interna alternativos son hoy por hoy el sistema más utilizado en el transporte, ya sea de uso comercial o particular. En función del tipo de encendido que usen se pueden dividir en motores de encendido provocado (MEP) o motores de encendido por compresión (MEC). Estos últimos estaban muy lejos en prestaciones sin embargo el avance tecnológico que han experimentado desde hace unos años ha provocado que esa distancia se reduzca considerablemente. Desde hace unos años, la inversión en investigación de este tipo de motores ya no se centra exclusivamente en el aumento de prestaciones, sino que se está encaminando a la reducción del impacto ambiental.

- Regulación del impacto ambiental:

La creciente sensibilización de la sociedad en lo que al cuidado del medioambiente se refiere, ha provocado que se promulguen leyes y diseñen reglamentos que limiten el impacto ambiental que un sector industrial pueda provocar. Dichos reglamentos evolucionan de tal modo que cada vez se vuelven más restrictivos. Por ello, la reducción de emisiones se ha convertido en una prioridad en la industria en general y en el mundo de la automoción en particular. Esta estrategia basada en normas Euro vienen reguladas por la Comisión Europea desde 1994 cuando entra en vigor la norma Euro I, la cual fija límites de emisiones de CO_2 , partículas suspendidas en los gases y la suma de hidrocarburos y compuestos nitrogenados. Sin embargo, esta estrategia de protección al medioambiente está en continua evolución volviéndose cada vez más restrictiva, dando así un claro mensaje a las industrias sobre la dirección que deben seguir en su investigación y desarrollo.

En la Figura 1 se puede ver cómo las distintas normas Euro han ido reduciendo la cantidad de emisiones permitidas de los distintos agentes contaminantes.

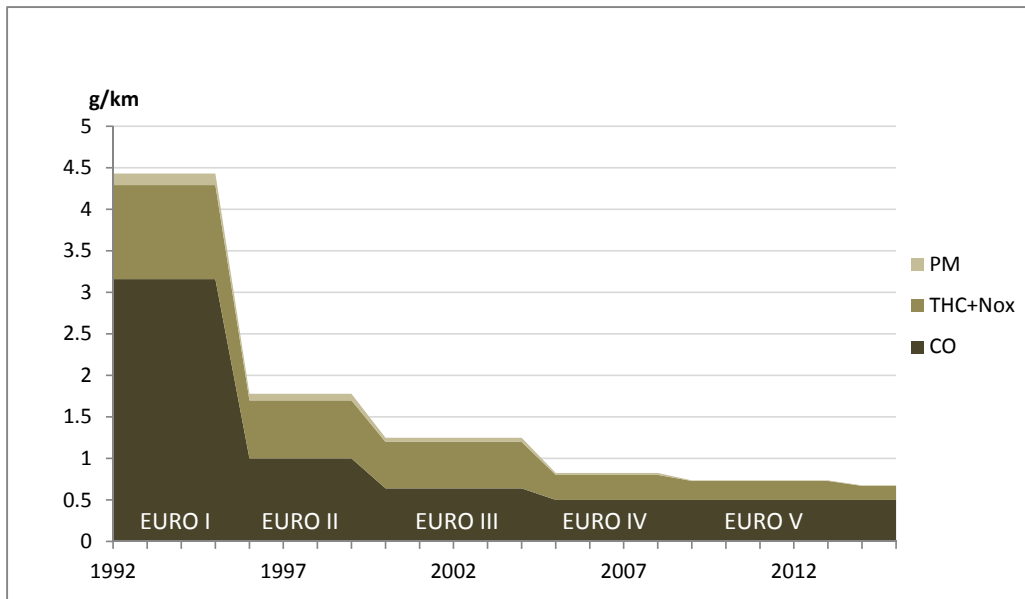


Figura 1: Evolución de las normas Euro

■ Normativa vigente:

El 20 de Junio de 2007, el parlamento europeo aprueba el Reglamento 715/2007 donde recoge los límites de emisión de gases contaminantes para turismos y vehículos comerciales ligeros, y con él, las normas Euro 5 y Euro 6 para la homologación de vehículos en lo que a emisiones se refiere. La norma Euro 5 es aplicable desde el 1 de Enero de 2011 en lo que respecta a matriculación y venta de nuevos vehículos, mientras que la norma Euro 6 será aplicable a partir del 1 de Septiembre de 2014 para homologaciones y del 1 de Septiembre de 2015 para nuevas matriculaciones.

Tanto la norma Euro 5 como la Euro 6, le dan especial importancia a los NO_x , los cuales no fueron restringidos de forma independiente hasta el año 2000 con la entrada de la norma Euro 3. En ese momento, los fabricantes de motores centran su atención en la capacidad de eliminación o reducción de este tipo de compuestos. Precisamente, En el caso de los motores de encendido por compresión la dificultad radica en la reducción de óxidos de Nitrógeno y partículas contenidas en los gases de escape. Las técnicas de post-tratamiento, la optimización de las estrategias de inyección y el control del dosado son suficientes para lograr que la cantidad de partículas contenidas en los gases de escape quede dentro de los límites establecidos por la normativa. Sin embargo, estas medidas no son efectivas para controlar los óxidos de

Nitrógeno, de ahí que la técnica de recirculación de gases de escape cobre un especial protagonismo.

- Recirculación de gases de escape (EGR):

Esta técnica consiste en la toma de un porcentaje de los gases que aparecen como producto de la combustión y redirigirlos de nuevo a la entrada de la cámara de combustión, mezclándose de este modo con parte del aire limpio que entra en la admisión del motor, de este modo se define la tasa de EGR como:

$$EGR = \frac{\dot{m}_{EGR}}{\dot{m}_{EGR} + \dot{m}_a} \quad (1)$$

Donde \dot{m}_{EGR} es el caudal másico de gas de escape recirculado y \dot{m}_a es el caudal másico de aire limpio.

Con esta estrategia lo que se consigue es reducir la concentración de oxígeno en la admisión y con ella la formación de óxidos de nitrógeno en el proceso de combustión. Dado que se está cambiando la composición del gas de entrada y las condiciones de la combustión como puedan ser la temperatura máxima, la velocidad de reacción o presión máxima, parece razonable pensar en una posible relación entre estos parámetros de combustión y el porcentaje de gas EGR que está entrando en dicha cámara. Sin embargo, aunque pueda parecer que la relación es evidente, una de las mayores dificultades que se pueden encontrar a la hora de aplicar dicha técnica es lograr que el reparto de este gas de escape recirculado sea equitativo entre todos los cilindros, ya que de otro modo se podría atenuar el efecto buscado o incluso comprometer el correcto funcionamiento del motor. Para poder garantizar estas condiciones de funcionamiento, el primer paso es poder medir o al menos estimar, el porcentaje de EGR que se está llevando cada uno de los cilindros del motor.

1.2. Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es poder estimar ese porcentaje de reparto de gas EGR en cada uno de los cilindros de un motor Diesel de inyección directa sobrealimentado con turbina de geometría variable a partir del análisis de los parámetros de combustión.

De forma secundaria, se aprovecha este estudio para determinar la posible influencia del cambio de la geometría de la admisión en el reparto del gas del escape recirculado entre cilindros.

2. METODOLOGÍA

Dado que son los parámetros físico-químicos del proceso de combustión los que servirán como base de estudio, el trabajo tiene un carácter fuertemente experimental, sin embargo, es necesario contar con un modelo teórico que complemente la información que se obtiene directamente de las mediciones.

2.1. Condiciones de Referencia

Es imprescindible fijar unas condiciones de referencia en las que podamos asegurar que el gas de escape recirculado esté perfectamente mezclado con el aire limpio, de este modo, la proporción de EGR por cilindro será la misma en todos ellos. Para lograrlo, se usa la configuración de baja presión (LP) donde el gas de escape es reconducido a la entrada del compresor, produciéndose una mezcla completa con el aire limpio una vez se haya llevado a cabo dicha compresión.

Cabe destacar que, en el caso de EGR LP, cualquier variación en los parámetros de combustión será debida a características intrínsecas del sistema y no a una posible diferencia de porcentaje de gas EGR en cada cilindro, puesto que al venir de una compresión, la mezcla se puede suponer completa. Dicho esto, es interesante señalar que se pueden tomar esos parámetros como referencia aún siendo distintos entre un cilindro y otro, ya que lo que se mide es la variación de la combustión en un mismo cilindro al cambiar de EGR de baja presión a EGR de alta presión.

2.2. Estudio Paramétrico

Para poder afirmar que las variaciones de los parámetros de combustión son debidos a la influencia del gas de escape recirculado, se debe hacer un estudio paramétrico del problema, de este modo, las variables que puedan influir en las condiciones de la combustión quedan aisladas. Por ello, tanto los puntos de funcionamiento del estudio como la referencia, deben compartir ciertas condiciones constantes como puedan ser el régimen de giro, la temperatura de admisión o la presión de admisión.

Los puntos de funcionamiento que son comparados con la referencia se fijan bajo las condiciones de EGR de alta presión (HP) precisamente para evitar que la mezcla sea homogénea y poder ver de este modo un reparto desigual del gas entre los cuatro cilindros.

Una vez fijado el punto de funcionamiento a ensayar teniendo en cuenta que

la referencia se tomará en LP y el punto a evaluar en HP, sólo queda comparar ambas situaciones con cada una de las configuraciones de geometría de admisión elegidas para estimar la influencia que dichas geometrías podrían tener en el reparto de EGR.

2.3. Configuraciones de Admisión

En este trabajo se opta por tres configuraciones distintas:

- Sin placa
- Con placa optimizada
- Con placa no optimizada

La admisión sin placa consiste en no restringir de ningún modo la entrada de la admisión. La placa optimizada es una solución que se adopta tras un estudio CFD para mejorar la distribución original del aire de entrada. Como situación ideal cabe esperar que la entrada de aire a la admisión se reparta de forma equitativa y cada uno de los cuatro cilindros, sin embargo esta circunstancia dista mucho de la realidad. Para tratar de lograr ese reparto equitativo del aire se diseña y simula en CFD una placa que recibe el nombre de optimizada. Esta placa tiene la peculiaridad de que sus orificios de entrada tienen distinta forma para tratar de compensar el desequilibrio del reparto de aire. Por último, la placa no optimizada consta de cuatro orificios de entrada iguales sin tener en cuenta ningún tipo de estudio o simulación previa.

2.4. Resumen

En resumen, teniendo en cuenta las tres posibles configuraciones de la admisión, y los dos tipos de ensayos para cada una de ellas, se estudiarán los datos obtenidos de seis tipos de ensayos, de los cuales, los LP servirán en cada caso como referencia de los HP tal y como se detalla en la Figura 2, donde además, se muestran las condiciones exactas en las que se hizo cada uno de los ensayos.

C	Tipo EGR	SPEED rpm	Masa de aire kg/h	Presión de admisión Bar
SIN PLACA	HP	2300.52	157.93	1.63
	LP	2300.95	153.23	1.63
OPTIMIZADA	HP	2301.45	155.66	1.63
	LP	2300.94	153.11	1.63
NO OPTIMIZADA	HP	2301.27	156.37	1.63
	LP	2300.95	156.89	1.63

Figura 2: Seis tipos de ensayos

3. INSTALACIONES

3.1. Sala de Ensayos

3.1.1. *Localización*

Los ensayos se llevan a cabo en una de las salas de pruebas externas del Laboratorio de Máquinas y Motores Térmicos perteneciente al departamento del CMT, edificio 6D.

La sala en cuestión es una de las tres salas climáticas de las que dispone el departamento, en este caso, la sala número 12. En ella, se monta el motor del que más adelante se darán más detalles.

3.1.2. *Descripción general*

El espacio útil de trabajo ha de cumplir ciertos requisitos a nivel técnico y de seguridad.

Es muy importante que haya espacio suficiente alrededor de la bancada en la que está montando el motor para poder llevar a cabo dichas reparaciones o modificaciones del sistema, por ello, la cámara cuenta con unas dimensiones de 3.7 x 3.5 x 3 metros, que son más que suficientes para que los operarios puedan desenvolverse con soltura.

Dado que se trata de una sala climática cuenta con un revestimiento de panel frío de 170mm de espesor que permite mantener temperaturas extremas en el interior.

La regulación de de la temperatura se realiza mediante 3 ventiladores de alta potencia (Ver Figura 3) que aprovechan el agua que circula a la temperatura deseada por unos conductos interiores.



Figura 3: Ventiladores de refrigeración

El suelo del interior de la cámara es ignífugo, antideslizante y seguro eléctricamente.

La cámara que alberga el motor y la sala de control, están separados por una ventana insonorizada de doble cristal de 8mm de espesor cada uno, son separación de 25mm y de dimensiones de 1.8 metros de alto por 1 de ancho, a través del cual se puede ver perfectamente el interior de la cámara con total seguridad tal como se muestra en la Figura 4

Para garantizar la seguridad, el depósito de combustible está situado en otra instalación alejada de la sala. También se dispone de sistemas de alarma tanto visuales como sonoros que alertan de peligros derivados de la alta concentración de CO , hidrocarburos o atmósfera explosiva. Para asegurar que las condiciones ambientales son seguras, la instalación dispone de un extractor que se comunica con el conducto de ventilación de la sala.

Con el fin de evitar posibles accidentes y fatiga durante las manipulaciones del motor, la cámara cuenta con unos potentes focos de iluminación que aportan unas condiciones lumínicas óptimas para el desempeño de las tareas de mantenimiento.

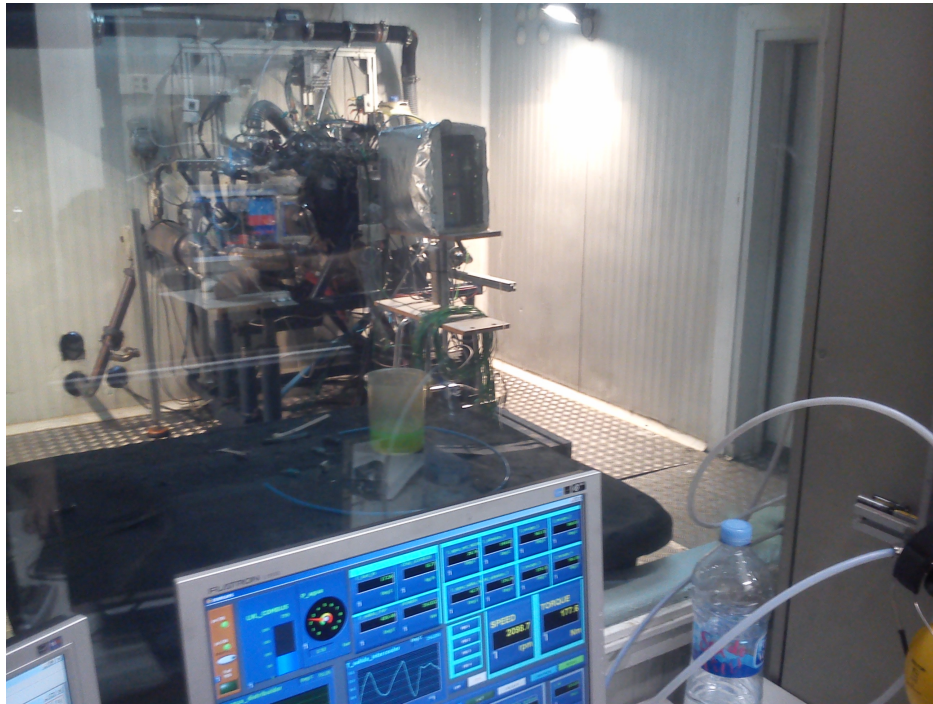


Figura 4: Ventana insonorizada

3.2. Instalación del Bloque Motor

3.2.1. *Motor*

El motor que se ha usado para este trabajo es un DW10C de PSA Peugeot-Citröen. Es un motor Diesel de 4 cilindros en línea y 1997cc de inyección directa sobrealimentado con un turbo grupo, cuyas especificaciones técnicas se detallan en la figura 6

En él se ha manipulado la geometría de admisión por medio de placas que modifican el modo en el que el flujo de aire entra en los cilindros. En la Figura 5 se muestra una comparativa de las geometrías, donde en la primera imagen aparece la propia admisión sin restricción alguna y en las dos siguientes se muestra tanto la placa optimizada como la no optimizada.

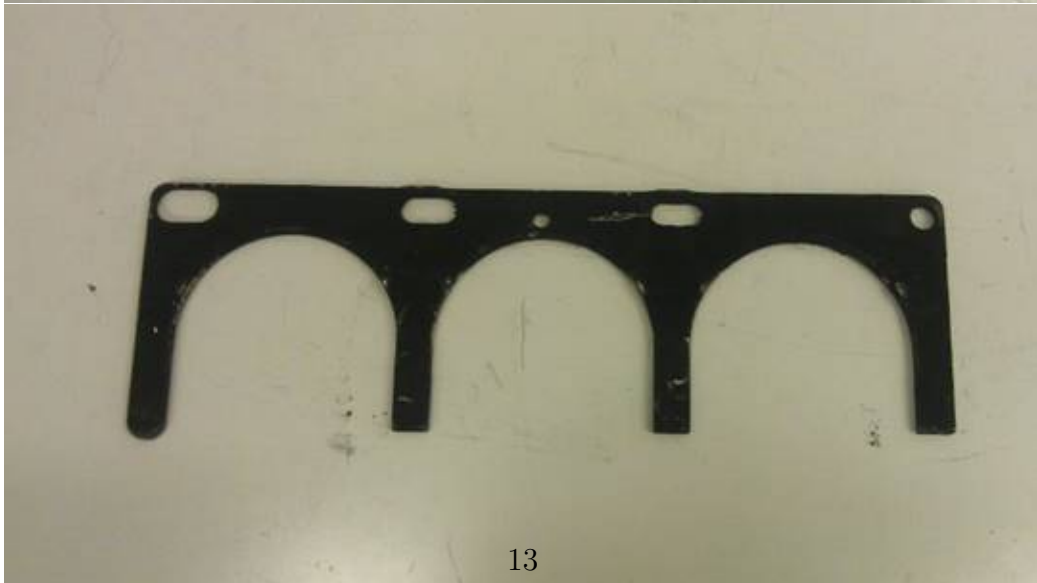
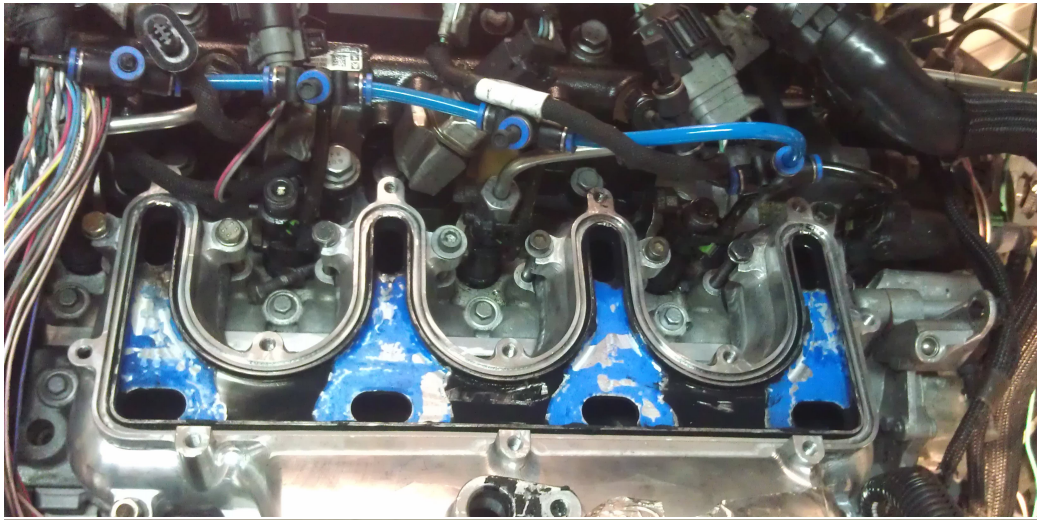


Figura 5: Configuraciones de admisión

3.2.2. Bancada

La bancada sobre la que está montado el motor, es ajustable, lo que es de extrema importancia para lograr una correcta alineación motor-freno como se explicará más adelante.

Cuenta con cuatro torres de cilindro roscado que permite poder variar la altura de cada una de ellas de forma independiente.

La bancada dispone además de una ranura para poder mover el motor de forma longitudinal, del mismo modo, en la base de cada una de las torres, hay una ranura orientada de forma transversal para lograr un ajuste en esa dirección.

Constructor	Peugeot
Modelo	DW10C 10DYWS BVM
Carrera del pistón (mm)	88,0
Diámetro del cilindro (mm)	85,0
Cilindrada (cm ³)	1997
Relación de compresión	17.6 +/- 0.5
Nº de cilindros	4
Disposición	4 EN LINEA
Nº de válvulas	16 Válvulas
Distribución	Doble árbol de levas en cabeza
Sobrealimentado	SI
Sis. de Sobrealimentación	Turbina de Geometría Variable (TGV)
Sistema de inyección	Inyección Directa Common Rail de 3ª generación
Presión Máx. Bomba Inyección	1800 bar
Control de inyección	Sistema Bosch
Potencia máxima (Kw./rpm)	(120/3750)
Par máximo (Nm/rpm)	(340/2000)
Par a la Potencia máxima (Nm)	300
Régimen máximo	5200 rpm
Potencia específica (CV/litro)	81.5

Figura 6: Especificaciones técnicas



Figura 7: Bloque motor-bancada

3.2.3. Freno dinamométrico

Para poder simular condiciones de trabajo en carga, el cigüeñal está conectado mecánicamente a un freno dinamométrico basado en una máquina eléctrica asíncrona la cual absorbe la energía procedente del cigüeñal para convertirla en energía eléctrica e inyectarla a la red.

El freno está situado en una sala contigua habilitada casi de forma exclusiva para este propósito.

Este sistema permite simular las condiciones de rodaje reales como puedan ser pendientes, rozamiento con la calzada o resistencia aerodinámica, todo ello gobernado por un controlador digital instalado en un armario de control próximo al puesto de adquisición de datos del técnico. Dicho controlador también proporciona información sobre el punto de funcionamiento como puede ser el par y el régimen de giro.

Para garantizar un correcto funcionamiento, el conjunto motor-freno ha de estar perfectamente alineado, lo cual se consigue con la regulación de la bancada. Sin embargo, podría no ser suficientemente precisa, motivo por el cual, el freno dispone de un amortiguador de par que absorbe los esfuerzos laterales provocados por una alineación defectuosa.

3.3. Instrumentación de Medida

Las instalaciones cuentan con numerosos sistemas de medición y de equipos para el tratamiento de la información recopilada durante los ensayos.

La cantidad de variables de las que se dispone es mayor de lo necesario considerando únicamente el marco de actuación de este trabajo. Esto se debe a que el motor en cuestión es objeto de múltiples ensayos e investigaciones.

En la figura 8 se ubican la mayoría de puntos de medida relevantes, a excepción de los ambientales, los de combustible, los de presión en cámara y los de los refrigerantes.

3.3.1. Condiciones de trabajo

El motor cuenta con sensores de todo tipo repartidos por su estructura. Dentro del ámbito de interés de este trabajo cabe destacar la siguiente relación de sensores y parámetros medidos:

- **Temperaturas:** En cada uno de los puntos de interés del motor hay colocado un termopar que para medir la temperatura en ese punto. Algunos puntos de interés pueden ser la entrada de la admisión, la salida del WCAC, la entrada, la entrada y salida de la turbina o la entrada al compresor. Aunque todos ellos se tienen en cuenta para garantizar que

las condiciones de ensayo se mantengan constantes, finalmente no todas son útiles a la hora de hacer un análisis final del proceso de combustión, sin embargo es importante ser conscientes de la importancia que tienen todas y cada una de ellas para poder asegurar que los ensayos son comparativos.

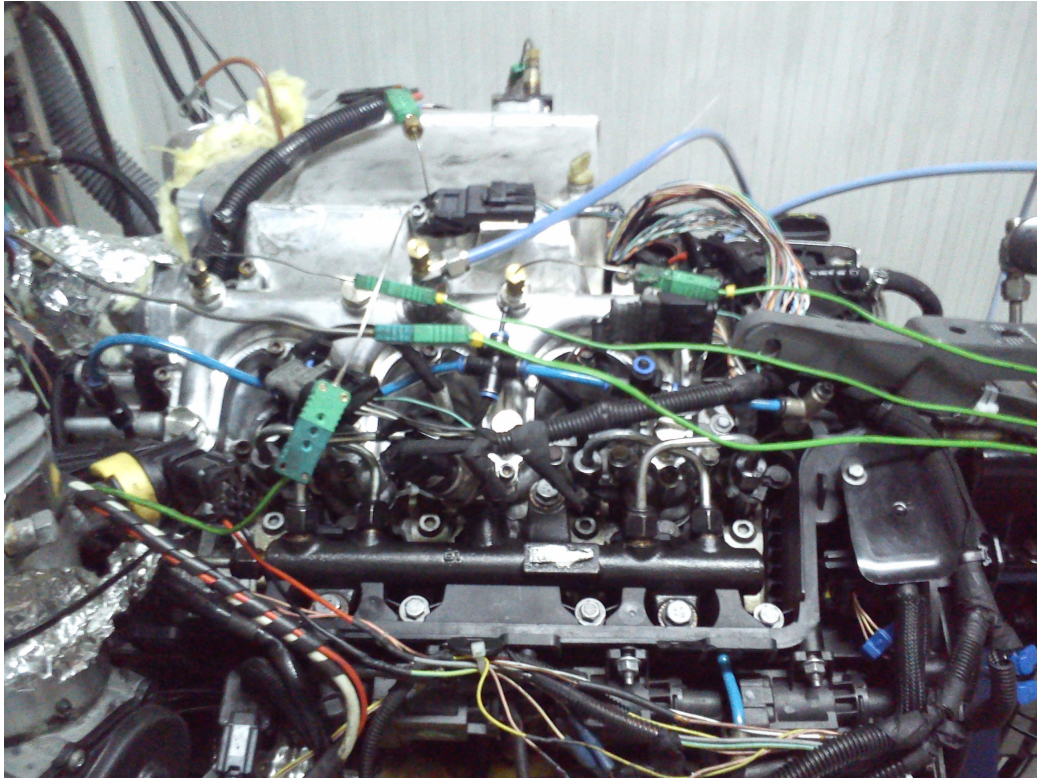


Figura 8: Sensores

- Presiones: Análogamente a las temperaturas, hay colocados sensores de presión en los puntos clave del sistema. En este estudio cobra vital importancia la presión en la entrada de la admisión, ya que si este parámetro variara de un ensayo a otro no se podrían tomar como comparativos.

Sin embargo, el modelo teórico en el que se apoya este trabajo se basa en la medida de la presión en la propia cámara, por ello hay un sensor de presión en cada uno de ellos, los cuales servirán de ventana al estado instantáneo del proceso de combustión en cada uno de los cilindros.

- Caudal másico: Otra variable muy importante para fijar las condiciones de referencia es el caudal másico de aire. Se ha de mantener lo más constante posible al cambiar de configuración de EGR LP a HP para poder llevar a cabo el análisis paramétrico.

3.3.2. *Parámetros de motor*

Aunque el conocimiento de estos parámetros no es estrictamente necesario para cumplir el objetivo que se busca en este trabajo, el hecho de poder disponer de este tipo de información enriquece la comprensión de las repercusiones que puede llegar a tener en el funcionamiento del motor la homogeneidad del reparto del EGR.

- Régimen de giro: El régimen de giro es fundamental para garantizar unas condiciones de ensayo estables. Con el fin de que los resultados puedan ser comparativos se ha de mantener el régimen de giro constante en el punto de funcionamiento deseado.
- Par efectivo: El par que está dando el motor viene determinado por el par resistente que está aplicando el freno electromagnético, del cual se tiene toda la información relevante en tiempo real.
- Potencia efectiva: Aunque no es una medida directa sino que viene determinada por el par efectivo y el régimen de giro, es interesante mencionarlo para tenerlo en cuenta a la hora de analizar una posible influencia de la dispersión del EGR sobre la potencia efectiva.

3.3.3. *Contaminantes*

En la sala de ensayos se cuenta con dos sistemas de medida de contaminantes.

El primero es un opacímetro, el cual analiza la cantidad de hollín contenido en el gas. El segundo, y que cobra más interés para el objetivo perseguido, es el analizador de gases de escape, el cual puede medir cantidades de monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y oxígeno.

(Ver Figura 9)

Este analizador es realmente importante para evaluar si las medidas de reducción de impacto ambiental exigidas por la normativa están siendo efectivas.



Figura 9: Analizador de gases y ordenador de control

3.3.4. Configuraciones LP/HP

- Alta y baja presión: Para fijar la referencia se dispone de un sistema de recirculación de gases de escape de baja presión. Esto significa que se conecta la salida de la turbina con la entrada del compresor llevando así los gases de salida aguas arriba del compresor. Por otro lado, se tiene la configuración HP donde los gases de escape se toman aguas arriba de la turbina y se mezclan con el aire limpio que proviene del compresor, por tanto, ambos gases se mezclan a la presión que se tenga a la salida del compresor. (Ver Figura 10).

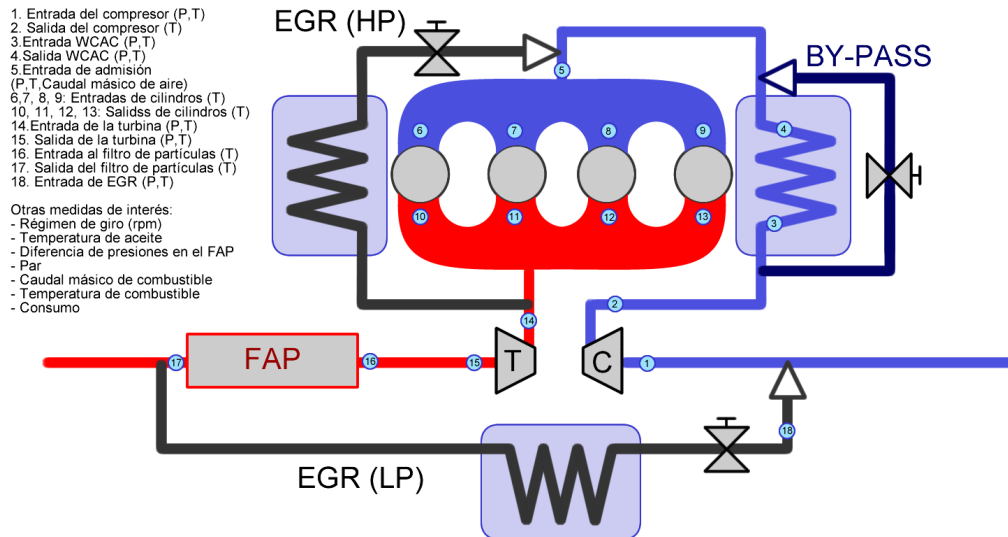


Figura 10: Circuito LP/HP

- Válvulas LP/HP: Para poder lograr llevar a cabo el cambio de una configuración a otra de forma rápida se utiliza un sistema de válvulas excluyentes. Este método permite hacer el cambio sin necesidad de detener el proceso y manteniendo así el punto de funcionamiento.
- FAP: Filtro antipartículas. Se encarga del postratamiento de gases. Se trata de un sistema de autolimpieza que almacena las partículas nocivas en un filtro. Estas partículas se queman y eliminan a alta temperatura, con lo que, cuando el motor trabaja a una temperatura determinada el propio calor de los gases de combustión limpia el filtro. Por ello, tras cada ensayo, para no alterar la siguiente medición de contaminantes, se limpia el filtro llevando el motor a un punto de funcionamiento en régimen permanente de 3000 rpm.
- WCAC: Intercambiador de calor. Tras la compresión la entalpía del gas aumenta y con ella la temperatura, por tanto es necesario disponer de un sistema que sea capaz de adecuar la temperatura de entrada de admisión a valores que se encuentren dentro del rango exigido en las condiciones de ensayo.
- By-Pass: En ciertos momentos puede interesar evitar el enfriamiento del gas, por ejemplo durante el encendido del motor, donde la cámara de combustión está todavía fría y lejos de unas condiciones favorables

para que se produzcan las reacciones. Hasta que el motor no alcanza la temperatura óptima de funcionamiento en el que todas las variables se estabilizan no se puede comenzar el ensayo, con lo que, evitar la refrigeración prematura implica reducir el tiempo de espera hasta comenzar el test.

3.4. Sala de Control

Hasta ahora se hizo una revisión de la cámara climática de la sala 12, sin embargo, el lugar de trabajo analítico se lleva a cabo fuera de dicha cámara, en la sala de control.

Tal y como se menciona en la descripción general, la sala de control está separada de la cámara climática por una ventana insonorizada. En dicha sala se encuentran los equipos necesarios para gobernar el control del motor, el del freno dinamométrico o las condiciones de la cámara climática.

En este área de trabajo, los técnicos de la sala también se hacen cargo de la toma de datos que reciben de los sensores, el procesado de la información de cada ensayo una vez recopilada o el control de las variables de funcionamiento durante el período de funcionamiento del motor.

Los recursos disponibles de la sala de control se podría dividir de la siguiente manera:

- Armario de control: En este armario se concentran los equipos de control como el X-actDE, el cuadro de suministro eléctrico, fusibles o la unidad central de seguridad, sin embargo, dada la naturaleza de este trabajo, vale la pena comentar la función del X-actDE.
 - Controlador X-actDE: Se trata de un controlador digital desde el cual se gobierna el conjunto motor-freno dinamométrico. Dicho controlador está conectado al resto de equipos de control y adquisición de datos. También recibe información como el par que está dando el torquímetro que lleva incorporado el freno.
- Equipos de adquisición de datos:
 - Ordenadores: Se dispone de dos ordenadores de trabajo. Uno se usa para el control de los parámetros del mapa motor y la ECU, y el otro para la adquisición de datos propiamente dicha y visualización de variables en tiempo real por medio del software LabView. Ambos ordenadores podrían considerarse también herramientas de control, puesto que están conectados al armario de control y desde ellos se puede influir en las variables del motor y del freno.

4. ENSAYOS

4.1. Estacionario C

Este trabajo queda dentro del marco de un conjunto de ensayos más amplio, el cual utiliza la normativa Euro 5 como referencia para evaluar la eficacia de las medidas tomadas. El nivel de contaminantes cambia con el punto de funcionamiento del motor, por esto que la normativa fija unas condiciones estándar para determinar los valores límite.

Dentro de estas condiciones se pueden distinguir principalmente dos: Ensayos en transitorio y ensayos en estacionario.

El modelo teórico de la combustión, CALMEC (que se explicará más adelante) se puede aplicar a transitorios mediante el análisis de las condiciones de combustión instantáneas, sin embargo este tipo de tratamiento de información excede los límites de este trabajo, por tanto, se explicará la metodología para la situación de régimen permanente.

Las condiciones de ensayo quedan determinadas a partir del régimen de giro, de la masa de aire entrante y de la presión a la entrada de la admisión.

4.2. Tipos de Ensayo

Puesto que se pretende que esas tres variables permanezcan constantes al cambiar entre cada una de las 6 configuraciones posibles, se elige el punto de funcionamiento en el que se cumplan dichas condiciones, en este caso, el denominado punto C, cuyas características son:

- Régimen: 2300 rpm
- Masa de aire: 155 kg/h
- Presión de admisión: 1.63 bar

Tal y como ocurre en cualquier problema de ingeniería, no es posible mantener unas magnitudes físicas totalmente invariables y más teniendo en cuenta los errores derivados de los propios equipos de medida, por tanto, se asume como razonable una desviación en el régimen de giro de un 1%, masa de aire de hasta un 4% y presión de admisión de un 1%.

Dado que se quiere estudiar el reparto de EGR con tres geometrías de admisión distintas, y cada punto de funcionamiento necesita evaluarse en LP y HP, se necesita un mínimo de 6 ensayos válidos para poder cubrir todas las posibilidades tal y como se especifica en las figuras 11, 12 y 13

SIN PLACA												
PARÁMETROS GLOBALES												
CONDICIONES						RENDIMIENTO				CONTAMINANTES		
	n	Mass flow	Intake P	T.med Adm	η_{vol}	Me	Pme	Ne	gef	CO2	HC	NOx
	rpm	kg/h	Bar	°C	%	Nm	bar	kW	g/kWh	%	ppm	ppm
HP	2300.5	157.93	1.63	77.77	85.60	111.70	7.03	26.91	246.29	9.58	69.48	166.61
LP	2301.0	153.23	1.63	76.10	86.17	108.10	6.80	26.05	252.79	9.63	84.37	138.65

Figura 11: Condiciones globales sin placa en admisión

NO ÓPTIMA												
PARÁMETROS GLOBALES												
CONDICIONES						RENDIMIENTO				CONTAMINANTES		
	n	Mass flow	Intake P	T.med Adm	η_{vol}	Me	Pme	Ne	gef	CO2	HC	NOx
	rpm	kg/h	Bar	°C	%	Nm	bar	kW	g/kWh	%	ppm	ppm
HP	2301.3	156.37	1.63	66.52	85.08	111.37	7.01	26.84	245.87	9.54	145.61	136.30
LP	2301.0	156.89	1.63	66.20	86.18	108.47	6.82	26.14	252.48	9.45	72.67	122.57

Figura 12: Condiciones globales con placa básica en admisión

PLACA ÓPTIMA												
PARÁMETROS GLOBALES												
CONDICIONES						RENDIMIENTO				CONTAMINANTES		
	n	Mass flow	Intake P	T.med Adm	η_{vol}	Me	Pme	Ne	gef	CO2	HC	NOx
	rpm	kg/h	Bar	°C	%	Nm	bar	kW	g/kWh	%	ppm	ppm
HP	2301.4	155.66	1.63	83.04	86.68	107.06	6.74	25.80	254.49	9.48	70.00	133.08
LP	2300.9	153.11	1.63	83.11	86.63	105.75	6.65	25.48	263.77	9.58	60.96	160.41

Figura 13: Condiciones globales con placa de reparto de flujo optimizado

4.3. Cambio de LP a HP en Estacionario

Es imprescindible que el punto a ensayar sea tal que las variables a aislar permanezcan constantes al cambiar de una recirculación de baja a alta presión. Esta restricción limita el número de puntos a evaluar, ya que hay puntos de funcionamiento en los que no se pueden obtener las condiciones de presión o temperatura de entrada que se logran en una situación de EGR de baja presión. Por este motivo, para este trabajo, de todos los ensayos realizados se ha seleccionado el punto de funcionamiento que se muestra más fiel a las variables a aislar dejando sus valores prácticamente constantes sea cual sea la geometría de entrada de admisión.

Se busca hacer los ensayos en régimen permanente, lo que obliga a iniciar un proceso de estabilización del motor durante el cual se monitorizan las varia-

bles de interés. En el momento en el que todas las temperaturas, el régimen de giro y los caudales máxicos de aire y combustible permanezcan constantes, se puede considerar que se ha entrado en régimen permanente.

Una vez el motor esté estabilizado se pueden comenzar los ensayos, los cuales se agruparán según las diferentes geometrías de admisión, esto significa que para cada una de dichas geometrías se fijarán las condiciones de régimen de giro, caudal máxico de aire y presión de admisión y se activará el EGR de baja presión para tomarlo como referencia. Tras haber tomado las medidas de los parámetros de interés durante el tiempo definido en el pliego, se cambiará a EGR de alta presión manteniendo constantes las variables anteriormente mencionadas. De este modo, el trabajo consta de seis ensayos agrupados en tres bloques de dos ensayos cada uno.

Cada uno de los tres bloques de ensayo son independientes entre sí, esto significa que para una geometría determinada de admisión, se fijan las condiciones globales de caudal máxico de aire, régimen de giro, presión de admisión y temperatura de admisión, y habiendo superado el transitorio, se empieza a medir mientras se genera EGR de baja presión para fijar la referencia, para después cambiar a EGR HP y finalizar la medida.

Se debe repetir el proceso para cada una de las tres geometrías, para finalmente, tratar los datos de la combustión por medio del modelo teórico del CALMEC.

4.4. Temperatura de Admisión

A pesar de que no se fija un valor concreto de la temperatura de admisión, es imprescindible que ésta se mantenga constante al pasar de EGR de baja presión a EGR de alta presión. Se hace hincapié en este hecho porque hay que tener en cuenta que el gas EGR de baja presión va a pasar por el compresor, el cual aumentará su entalpía, con lo que, si no se refrigera adecuadamente ese gas, difícilmente se podrá controlar la temperatura en la entrada de la admisión.

Para ver cómo afecta este gas recirculado a la temperatura de admisión, se muestra el siguiente balance de entalpía:

$$\dot{m}_{EGR} \cdot c_{pEGR} \cdot T_{EGR} + \dot{m}_a \cdot c_{pa} \cdot T_a = \dot{m}_{adm} \cdot c_{padm} \cdot T_{adm} + H_{perd} \quad (2)$$

Se asume que los calores específicos del aire, del gas EGR y del gas en admisión son iguales para simplificar la ecuación, sabiendo que el error es despreciable. Como sólo se quiere ver la influencia del EGR en la temperatura, se supone la admisión adiabática para despreciar las pérdidas y poder ver así la relación simplificada. De este modo, la ecuación (2) queda como:

$$T_{adm} = T_a + EGR(T_{EGR} - T_a) \quad (3)$$

Donde se puede ver claramente que el EGR tiene una gran influencia en la temperatura en la admisión.

5. MODELO TEÓRICO DE COMBUSTIÓN

Para la realización de este estudio se toman como base las medidas instantáneas de presión en cada una de las cámara de combustión. A partir de ellas, se aplica un modelo de diagnóstico que permite deducir el resto de parámetros de la combustión apoyándose en la información sobre la geometría del motor.

5.1. Hipótesis

Para la aplicación de este modelo se han asumido las siguientes hipótesis:

1. La mezcla de los gases se comporta de forma ideal
2. La presión en cámara se considera uniforme
3. Las especies que coexisten en la cámara de combustión son: combustible en forma de gas, aire y productos de la combustión
4. Existe deformación de los elementos en movimiento debido a la presión e inercia
5. Se produce transmisión de calor por convección a las paredes de la cámara de combustión

5.2. Determinación de la Ley de Calor

Como se mencionaba en la introducción, se utiliza la presión instantánea para aplicar posteriormente el modelo teórico e información adicional que se extrae del motor, sin embargo no es la única información que se necesita. También es necesaria información sobre temperaturas, gastos máscicos,

presiones y otras variables que están relacionadas con las condiciones de funcionamiento del motor, además de todos los parámetros geométricos del MCIA estudiado.

Es posible obtener estos valores de la presión en cámara gracias al equipo de toma de datos de los sensores de presión, que es capaz de procesar entradas cada 0.5° de giro de cigüeñal. La resolución del equipo de medida es muy importante si se quiere obtener una fracción de calor liberado (FQL) lo más ajustada posible así como la tasa de liberación de calor (dFQL), ya que ambas quedarán expresadas en función del ángulo de giro del cigüeñal.

5.2.1. *Fracción de calor liberado*

Debido a las pérdidas por efecto *blow-by* y al aporte de combustible, se considera la cámara de combustión como un sistema abierto. Este fenómeno se produce al escapar parte de los gases de combustión debido a las elevadas presiones que aparecen en la cámara, encontrando éstos espacio entre las pequeñas holguras que puedan existir en los ajustes de los segmentos. Ello provoca que existan pérdidas debidas a ese gas que consigue escapar. Teniendo este tipo de pérdidas en mente y la entrada de combustible en la cámara de combustión, se aplica al sistema el primer principio de la termodinámica, en el que la variación de energía interna se expresa como:

$$dU_c = -dQ + dW + h_f \cdot dm_f - h_{pb} \cdot dm_{pb} \quad (4)$$

Donde:

U_c := Energía interna teniendo en cuenta las tres especies coexistentes (aire, combustible y productos de combustión)

Q := Calor transmitido a las paredes

W := Trabajo

h_f := Entalpía del combustible entrante

m_f := Masa de combustible entrante

h_{pb} := Entalpía de los gases perdidos por *blow-by*

m_{pb} := Masa de los gases perdidos por *blow-by*

Adicionalmente, se asumen las siguientes equivalencias:

$$dW = -p \cdot dV$$

$$h_{pb} = R_{pb} \cdot T_{pb}$$

$$dU_c = m_c \cdot c_v \cdot dT$$

Teniendo en cuenta la propia energía interna del combustible, el calor liberado en la combustión puede expresarse como suma de la energía interna, el calor cedido a las paredes del cilindro, el trabajo que realizan los gases, la energía invertida en la inyección del combustible y el trabajo del flujo de pérdidas por *blow-by* tal como se muestra en la ecuación siguiente:

$$dFQL = m_c \cdot c_v \cdot dT + dQ + p \cdot dV - (h_f - u_f)dm_f + R_{pb} \cdot T_{pb} \cdot dm_{pb} \quad (5)$$

Aplicando este modelo teórico se pueden obtener valores instantáneos de la fracción de liberación de calor, lo que permite estudiar la evolución del proceso de combustión en cada ciclo.

5.3. Comienzo y Final de la Combustión

Tal como se ha explicado, el modelo teórico usado permite obtener con relativa facilidad los valores instantáneos de liberación de calor, sin embargo, determinar el momento exacto del inicio o final de la reacción de combustión puede ser algo más peliagudo. Por este motivo, CALMEC aporta diversa información que puede servir como buena referencia para tomar ciertos puntos como referencia.

5.3.1. Inicio y final de la combustión

El *software* que usa el departamento muestra información sobre el ángulo de giro del cigüeñal para el cual se ha quemado un cierto porcentaje de combustible. Esto es realmente útil puesto que es habitual fijar como punto de inicio de la combustión un valor porcentual de esa masa de combustible quemada, comprendido entre el 1 % y el 10 %. Del mismo modo, se fija el valor entre el 90 % y el 99 % de masa de combustible quemada como punto final de la combustión. Tanto es así, que en las tablas aportadas en este documento se aportan los valores correspondientes a ese 90 % de combustible quemado.

En la figura 14 se muestran valores de grados de giro del motor para distintos porcentajes de combustible quemado.

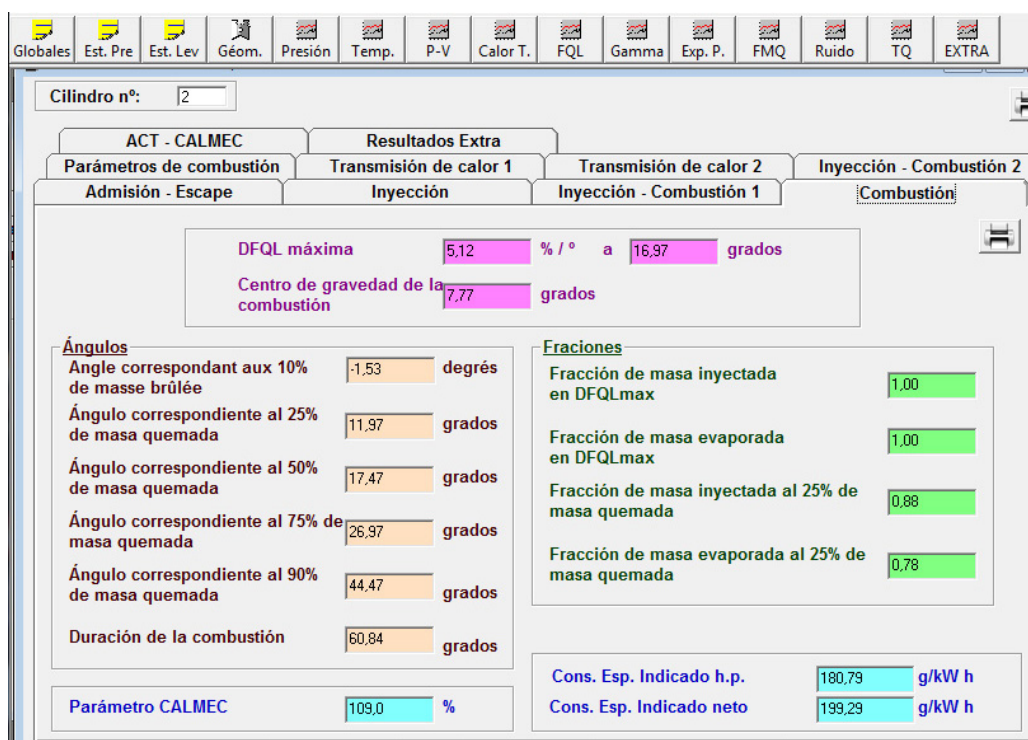


Figura 14: Ángulos de cigüeñal para un porcentaje de combustible quemado (Captura de CALMEC)

5.3.2. Otros parámetros de la combustión

Todo el posprocesado de datos se ha llevado a cabo con el programa CALMEC, el cual no sólo aporta información intrínseca a la combustión, sino que facilita otro tipo de datos relativos a rendimientos, parámetros de inyección o consumos, tal y como se puede ver en la siguiente figura:

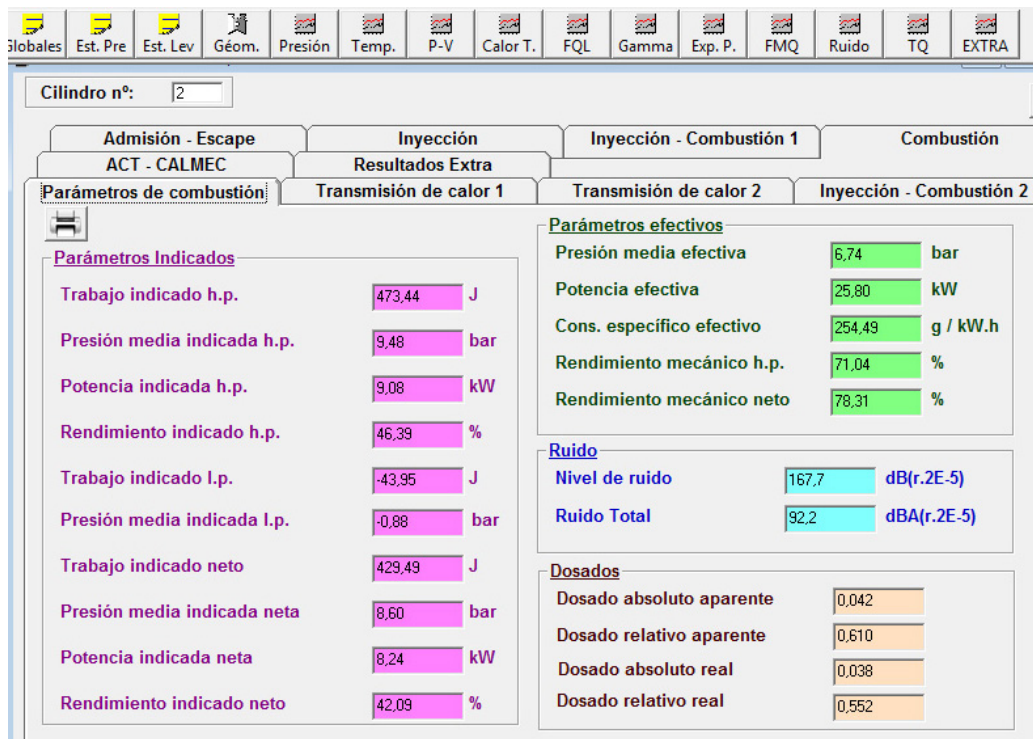


Figura 15: Parámetros indicados y efectivos (Captura de CALMEC)

5.4. Sobre CALMEC

Se ha resumido brevemente el proceso de obtención de la fracción de liberación de calor, el cual realmente es mucho más amplio de lo que aquí expuesto. El equipo de investigación del CMT ha desarrollado un programa bajo licencia comercial llamado CALMEC que implementa este modelo de forma fiable y que permite optimizar el diagnóstico de la combustión para cada motor.

Todo el procesado de los datos obtenidos del motor se ha llevado a cabo con el *software* CALMEC. Una vez estudiados e interpretados se han exportado a EXCEL simplemente por comodidad a la hora de implementarlo en LATEX, sin embargo, el CALMEC ofrece la posibilidad de mostrar todo tipo de gráficas de los parámetros que se han mostrado en las figuras anteriores.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con el fin de seguir un orden coherente con el resto del trabajo se agrupan los resultados según la geometría de admisión.

Para no perder perspectiva a la hora del posterior análisis, es interesante recordar que las comparativas se hacen de un mismo cilindro en situación de combustión con EGR de LP frente a la combustión de EGR HP. En esas dos situaciones se analizan los parámetros de combustión que pueden dar respuesta a la cuestión del reparto del EGR entre cilindros, como puede ser el retraso de la combustión o el momento en el que el 90% de la masa de combustible se haya quemado (mf 90%).

En esta sección, se incluyen únicamente los comentarios de los resultados y sus interpretaciones usando en todo momento como base la información recogida en la parte IV, en la cual se recogen todas las tablas y gráficos obtenidas a partir de las medidas tomadas en los ensayos.

6.1. Referencia

Como punto de partida se debe prestar especial atención a las condiciones de combustión de referencia para poder entender el comportamiento de cada uno de los cilindros en condiciones normales. Dicha información se obtiene a partir del ensayo de EGR de baja presión, donde el valor porcentual de EGR es el mismo en cada cilindro, luego, en caso de haber diferencias en la combustión entre cilindros, serán debidas a las propias características de cada una de las cámaras, y no a la dispersión desigual del EGR.

Atendiendo a la comparativa global de temperatura y presión entre cilindros con EGR LP para cualquiera de las geometrías de admisión dispuestas, se observa claramente como el cilindro 3 tiene una combustión mucho más problemática que el resto teniendo en cuenta los parámetros de combustión de la figura 16. Del mismo modo, el cilindro 4 despunta en todos los parámetros derivados de la combustión, especialmente si se compara con los del cilindro 3 como se ve claramente en la siguiente tabla:

LP	P máx Bar	T máx °C	Duración Grados	Wi J	Pmi Bar	Ni kW	η_i %
Cyl 1	78.86	1470.40	58.87	478.03	9.57	9.17	46.71
	77.95	1471.00	59.13	470.95	9.43	9.03	45.08
	79.46	1438.10	57.69	483.41	9.68	9.27	47.13
Cyl 2	79.74	1475.20	60.57	479.83	9.61	9.20	46.88
	78.79	1469.00	60.23	466.26	9.34	8.94	44.63
	79.44	1430.20	58.88	476.00	9.53	9.13	46.41
Cyl 3	73.98	1315.90	56.78	389.69	7.80	7.47	38.07
	73.16	1315.50	57.97	385.40	7.72	7.39	36.89
	74.44	1293.50	56.80	399.83	8.01	7.67	38.98
Cyl 4	80.98	1512.60	61.08	501.63	10.05	9.62	49.01
	80.10	1510.00	63.06	490.08	9.81	9.40	46.91
	80.75	1464.40	61.13	499.44	10.00	9.58	48.69

Figura 16: Parámetros de combustión con EGR LP en diferentes configuraciones de admisión

Este comportamiento dispar se ve con mayor claridad en las gráficas de temperatura, presión y de fracción de calor liberado. (Figuras 21, 23, 38, 40, 55 y 57)

Una vez se ha visto que la calidad de la combustión viene condicionada por el propio cilindro a analizar, es evidente que las conclusiones sólo pueden sacarse tras comparar el comportamiento de un mismo cilindro en condiciones distintas ya que de hacerlo de otro modo, se estaría partiendo de una hipótesis errónea, que sería suponer que en los cuatro cilindros se produce una combustión de iguales características en condiciones normales.

6.2. Variación del Porcentaje de EGR en Cada Cilindro

- Placa no optimizada: Teniendo instalada la placa no optimizada se analizan los parámetros de combustión cilindro a cilindro al pasar de EGR LP a EGR HP, de este modo se ve cómo varían éstos debido únicamente al cambio del sistema EGR, ya que el resto de variables permanecen constantes.

Atendiendo a las curvas de temperatura, presión y FQL, se observa que las mayores diferencias en la combustión se dan en el cilindro 1 y en el cilindro 4.

En el cilindro 1 las curvas de temperatura, presión y FQL en EGR LP quedan por encima de esas mismas curvas para el EGR HP. Esto indica

que se alcanzan temperaturas y presiones más altas cuando se tiene el EGR repartido en el mismo porcentaje que en el resto de cilindros, por otro lado, que la FQL quede por encima cuando hay EGR LP significa que el calor de la reacción se está liberando de una forma más rápida en comparación con la situación de EGR HP.

Dado que el EGR de alta presión no es capaz de mezclarse al mismo nivel que lo hace el del baja presión debido a que el de baja se ve forzado a mezclarse con el aire limpio en el compresor, y dado que el aumento de porcentaje de EGR en un cilindro disminuye la intensidad de la reacción, esto parece indicar que el cilindro 1 se está llevando mayor porcentaje de EGR en comparación al que tenía cuando recibía el EGR LP.

Para que este razonamiento sea válido, es necesario que este comportamiento sea compatible con lo que sucede en el resto de cilindros, esto significa, que si al cilindro 1 se está yendo más EGR en alta presión del que recibía con EGR de baja presión, debe de existir otro cilindro que esté recibiendo menor cantidad, o dicho de otro modo, la calidad de combustión de otro u otros cilindros debe de mejorar al pasar de EGR LP a EGR HP.

Analizando lo que sucede en el cilindro 4, se observa que todos los parámetros de combustión aumentan al pasar de LP a HP. A pesar de que la presión muestra un aumento bastante discreto, la temperatura aumenta de forma más evidente, así como la FQL. Este hecho es compatible con el comportamiento que tenía el cilindro 1. Mientras que en el cilindro 1 empeora la combustión, en el cilindro 4 mejora, al mismo tiempo que se mantiene relativamente constante en los cilindros 2 y 3. Dado que todos estos cambios se producen únicamente al cambiar de EGR LP a HP, parece razonable pensar que los cambios en los parámetros de combustión se deben a la variación de la cantidad de EGR presente en cada cilindro. En este caso, en el cilindro 1 habría un aumento de EGR mientras que en el cilindro 4 una disminución, mientras que en los cilindros 2 y 3 la variación parece despreciable.

- Placa optimizada: Una vez instalada la placa que optimiza el reparto de flujo en la admisión (al menos de forma teórica), se estudian los resultados derivados de las medidas con esta configuración. En este caso la diferencia de la combustión en cada cilindro al cambiar el tipo de EGR son bastante pequeñas. Recurriendo a la FQL al 90% se observa que los cilindros 1 y 2 tienen una reacción algo más lenta en condiciones de EGR HP, mientras que los cilindros 3 y 4 experimentan una mejora en relación a la reacción que se daba con EGR LP, sin embargo, estas

variaciones son bastante pequeñas y no están totalmente respaldadas por los valores máximos de temperatura, por lo tanto sería arriesgado afirmar rotundamente que el cilindro 2 se está llevando más EGR o que en el 3 está entrando menos.

Este ensayo debería considerarse no concluyente en lo que a la variación del reparto de EGR se refiere.

- Sin placa: Retirando cualquier restricción de la admisión se analizan de nuevo los parámetros de combustión.

En este caso se ve con mayor claridad cómo al cambiar de EGR LP a HP los cilindros 1, 2 y 3 sufren una caída de la calidad de la combustión, mientras que en el cilindro 4 los parámetros mejoran claramente.

En los primeros tres cilindros las curvas de presión con EGR LP quedan por encima de las mismas curvas con EGR de alta presión, aunque no serían argumento suficiente para sentenciar que hay un cambio claro en el porcentaje de EGR, sin embargo, la fracción de calor liberado sí es mucho más representativo. Las curvas de FQL para estos mismos tres cilindros muestran que las reacciones con EGR de baja presión son algo más rápidas que al cambiar a alta presión. Como contrapartida se encuentra el cilindro 4 que presenta una reacción mucho más vigorosa al pasar a EGR HP como se puede ver tanto en las curvas de presión, temperatura o FQL.

7. CONCLUSIONES

- Estimación de la variación del porcentaje de EGR en cada cilindro a partir de los parámetros de combustión:

Viendo los resultados obtenidos en este trabajo, se puede afirmar que es posible estimar la variación de EGR a partir del análisis de los parámetros de combustión, siempre y cuando se aísle el resto de variables. Sin embargo, es importante ser prudentes a la hora de interpretar los datos ya que un juicio precipitado a partir únicamente de valores máximos de presión o temperatura podrían llevar a conclusiones falsas. Además, es importante aclarar que con este método no es posible cuantificar dichos porcentajes, sino entender de una forma más bien cualitativa qué cilindro está recibiendo más o menos EGR.

Otra conclusión importante es advertir que la fracción de calor liberado se presenta como un parámetro de la combustión mucho más fiable que los valores máximos de otras variables, ya que muestra de una manera más representativa la evolución real de la combustión.

- Variación del reparto de EGR en función de la geometría de de la admisión:

El cambio de geometría en la admisión influye en el comportamiento del flujo y además en el porcentaje de reparto de EGR en cada cilindro, siendo la placa no optimizada la que hace un reparto más desequilibrado entre los cuatro cilindros, mandando al cilindro 1 la mayor parte del EGR y llevando al cilindro 4 mayor porcentaje de aire limpio.

Parte II

PLIEGO DE CONDICIONES

1. GENERAL

1.1. Seguridad e higiene

Puesto que se trabaja con un motor se generan gases combustión y productos nocivos para la salud. Por ello, es imprescindible que la sala de trabajo cumpla unas condiciones de seguridad apropiadas.

A continuación se citan algunas que se consideran de especial importancia pero que en ningún caso deben considerarse suficientes sin tener en cuenta las condiciones particulares de la sala donde se vayan a llevar a cabo los ensayos:

- Espacio: La sala debe de ser suficientemente amplia para asegurar que los técnicos puedan desenvolverse con soltura y seguridad en el desempeño de cualquier tarea de control, mantenimiento o reparación de los equipos.
- Ventilación: La sala debe disponer de los sistemas de ventilación y extracción de gases necesarios para garantizar que la concentración de gases perjudiciales para la salud no llegue a los límites establecidos por la normativa vigente.
- Iluminación: El espacio de trabajo ha de estar adecuadamente iluminado de forma que el trabajo se pueda llevar con total precisión y seguridad. En caso de haber máquinas o elementos rotativos se deben evitar lámparas cuya frecuencia pueda provocar un accidente por efecto estroboscópico.
- Insonorización: El motor ha de estar en una cámara insonorizada por motivos de higiene laboral.
- Combustible: El combustible debe de estar alejado de la sala de ensayos para garantizar la máxima seguridad.
- Alarmas: Las instalaciones deben disponer de las correspondientes señales tanto acústicas como luminosas que adviertan de un posible peligro de alta concentración de gases.

- Equipamiento: Cada técnico y operario debe disponer del equipamiento necesario que garantice que el desempeño de su trabajo se pueda llevar a cabo bajo las máximas condiciones de seguridad, esto implica guantes, calzado cerrado, gafas protectoras o cualquier otro elemento que se considere de uso necesario para realizar la tarea en cuestión.

1.2. Motor y Equipos

Se ha de verificar que todos los elementos que van a intervenir en los ensayos están en condiciones de ser utilizados.

1.2.1. Motor

- Comprobar el nivel de aceite.
- Comprobar el nivel de agua.
- Comprobar que todos los conductos que transporten líquidos están debidamente conectados, fijados y sin pérdidas.
- Comprobar que el freno y el motor están alineados.
- Comprobar que no hay sensores sueltos o rotos.
- Comprobar que la balsa de combustible está llena.

1.2.2. Adquisición de datos

- Comprobar que el software de adquisición de datos conecta con el control del motor.
- Comprobar que la ECU conecta correctamente con el motor.
- Comprobar que el ordenador de control recibe información del freno.
- Comprobar que los conductos de medición de contaminantes no están obstruidos.
- Purgar el medidor de contaminantes.

2. ENSAYOS

2.1. Montaje de Placa de Admisión

Dado que el trabajo engloba tres configuraciones distintas de admisión, éstas han de ser montadas antes de comenzar cada uno de los tres ensayos a realizar en caso de que el ensayo en cuestión lo requiera.

2.1.1. *Listado de ensayos a realizar*

- Admisión con placa no optimizada: Requiere el montaje de la placa no optimizada en la admisión.
- Admisión con placa optimizada: Requiere el montaje de la placa optimizada en la admisión.
- Admisión sin placa: Requiere el desmontaje de la placa que haya montada en caso de haberla.

2.2. Estabilización del Motor

Dado que se desea hacer los ensayos en régimen permanente, se fija el punto de funcionamiento deseado desde el control del motor y del freno, y se espera el tiempo necesario hasta que el motor lo alcance y todas las variables del sistema se estabilicen. Esto implica que se ha de controlar la temperaturas, ya sean del propio motor, gases, ambiente o fluidos que intervengan, así como presión de aceite, presión a la entrada del compresor y todas aquellas variables que induzcan al motor a alejarse del régimen permanente.

Dada la naturaleza de este trabajo, es especialmente importante que el caudal másico de aire, la presión de admisión, temperatura de admisión y el régimen de giro permanezcan constantes durante todo el ensayo.

2.3. Punto de Funcionamiento

El punto de funcionamiento buscado es el correspondiente a:

- Régimen de giro: 2300 rpm
- Caudal másico de aire: 155 kg/h
- Presión de admisión: 1.63 bar

2.4. Cambio de EGR LP a EGR HP

El montaje está diseñado de tal forma que para cambiar de una configuración de EGR de baja presión a EGR de alta presión, únicamente es necesario alternar la apertura de las válvulas que regulan ambos sistemas de EGR. Esto se puede hacer de forma automática desde el puesto de control, previo montaje de dichos sistemas de EGR en el bloque motor. Una vez esté configurada la admisión de la forma adecuada y el motor estabilizado en el punto de funcionamiento indicado, el procedimiento del ensayo es el siguiente:

1. Se comienza el ensayo con el sistema EGR LP activo.
2. Se comienzan a registrar las variables mediante el sistema de adquisición de datos del que se dispone en el puesto de control.
3. Tiempo de registro de variables: 400s.
4. Al cumplir 400s se cambia el circuito de EGR LP a EGR HP de forma automática desde el puesto de control sin detener el motor.
5. Tiempo de registro de variables con EGR HP: 400s.
6. Tiempo total de ensayo: 800s.
7. Una vez transcurridos los 800s, se detiene el registro de variables y se limpia el FAP llevando al motor a un punto de altas revoluciones hasta que la diferencia de presiones entre salida y entrada del FAP recupere su valor inicial.
8. Repetir el proceso para cada una de las tres configuraciones de admisión.

Parte III

PRESUPUESTO

Para el cálculo de este presupuesto se han tenido en cuenta todos los factores susceptibles de generar gasto y se han agrupado por personal, fungibles, amortización de instalaciones y equipos e impuestos. Todo ello sujeto a la cantidad de tiempo empleado para la realización del montaje, modificaciones, ensayos y análisis de datos.

Este trabajo se ha llevado a cabo en tres meses, de los cuales, dos se dedicaron única y exclusivamente a trabajo en la sala en tareas de montaje, mantenimiento, modificaciones y ensayos, y un mes para el posterior análisis de datos, por este motivo, las horas dedicadas de cada trabajador es diferente en función de la tarea que tuviese asignada.

1. FUNGIBLES

Fungibles	Unidades	Precio/unidad	Coste
Aceite SAE 5W 30	5	9.00	45.00
Combustible Diesel	140	1.38	193.62
Refrigerante	150	1.50	225.00
Filtro de aceite	1	15.00	15.00
Filtro de gasoil	1	70.00	70.00
			548.62

Figura 17: Fungibles

2. AMORTIZACIÓN

Puesto que el departamento de Motores Térmicos dispone de los equipos y las instalaciones necesarias, no ha sido necesario comprarlos, por tanto, para el cálculo del gasto que supone la utilización de las instalaciones y equipos se incluye en forma de amortización calculada a 10 años.

El departamento de Motores Térmicos ha facilitado la información relativa a la amortización de la Sala 12 para este trabajo y la cuantifica en 19331.2 euros/mes, por tanto, teniendo en cuenta que para este trabajo se han empleado 56 horas de trabajo en la sala de ensayos, el coste se calcula como:

$$\frac{19331,2}{200} \cdot 56 = 5412,74 \text{ euros}$$

3. PERSONAL

Para el cálculo del coste del personal por hora se considera que trabajan 46 de las 52 semanas y 40 horas semanales, donde cuatro de esas seis semanas restantes corresponden a vacaciones y las otras dos a los días festivos del año. Por tanto, el número de horas trabajadas por año son: $46 * 40 = 1840h$
Para el cálculo del coste de personal se considera el salario bruto obtenido del boletín provincial de Valencia de 2014.

- Técnico de sala:
 - 18405.00 euros/año
 - 10.02 euros/h
- Ingeniero de análisis:
 - 21125.64 euros/año
 - 11.48 euros/h

Empleado	Horas	Coste/h	Coste
Técnico de sala	56	10.02	561.12
Ingeniero de análisis	120	11.48	1377.60
			1938.72

Figura 18: Coste de personal

4. PRESUPUESTO TOTAL

Concepto	Coste	IVA (21%)	Total
Personal	1938.72	407.13	2345.85
Fungibles	548.62	115.21	663.83
Amortización	5412.74		5412.74
			8422.42

Figura 19: Presupuesto total

Parte IV

ANEJO

1. PLACA NO OPTIMIZADA

Para esta configuración de la admisión se ha dispuesto la placa que no estaba sujeta al estudio de optimización CFD, la cual consta de cuatro orificios de igual diámetro.

La placa en cuestión se muestra en la figura 5.

1.1. Condiciones de Ensayo y Parámetros de Combustión

En la figura 20 se muestran los datos de mayor interés emparejados por cilindro para el EGR de baja presión frente al de alta presión.

A pesar de que se aportan gráficas que muestran toda la evolución de la combustión en cada cámara, es útil disponer de los valores más significativos dentro del rango de estudio, como pueden ser la presión y temperatura máximas que se alcanzan en cada cilindro o los ángulos de inicio y duración de la combustión.

PLACA NO ÓPTIMA															
PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN											RENDIMIENTO				
		Inicio	Retraso	P máx		T máx		dFQL máx	mf 50%	mf 90%	Duración	Wi	Pmi	Ni	ηi
		Grados	Grados	Bar		°C		Grados	Grados	Grados	Grados	J	Bar	kW	%
Cil 1	LP	-16.93	4.94	79.46	-1.55	1438.10	-20.10	16.70	17.08	40.71	57.69	483.41	9.68	9.27	47.13
	HP	-17.20	4.68	77.91		1418.00		16.70	17.54	44.45	61.69	473.25	9.48	9.08	46.14
Cil 2	LP	-16.88	5.00	79.44	-0.71	1430.20	8.00	16.47	17.18	41.97	58.88	476.00	9.53	9.13	46.41
	HP	-16.94	4.94	78.73		1438.20		16.47	17.41	43.82	60.78	473.67	9.49	9.08	46.18
Cil 3	LP	-18.11	3.77	74.44	-0.93	1293.50	0.40	15.39	16.29	38.68	56.80	399.83	8.01	7.67	38.98
	HP	-18.10	3.78	73.51		1293.90		15.39	16.38	40.09	58.18	392.29	7.86	7.52	38.25
Cil 4	LP	-17.08	4.80	80.75	0.75	1464.40	55.40	16.18	16.95	44.02	61.13	499.44	10.00	9.58	48.69
	HP	-17.20	4.68	81.50		1519.80		16.18	16.39	41.18	58.42	504.63	10.11	9.68	49.20

Figura 20: Parámetros de combustión y rendimiento

1.2. Comparativa Global de LP y HP

1.2.1. Temperatura en los cuatro cilindros:

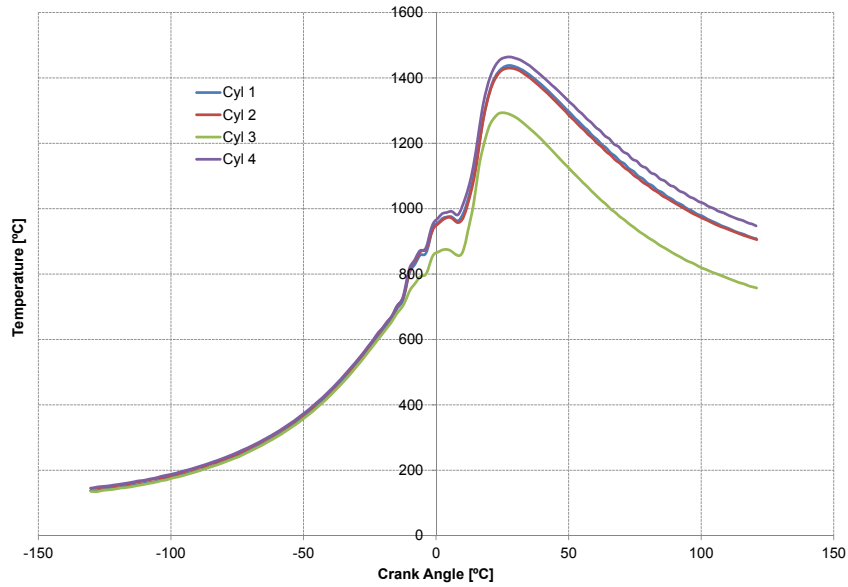


Figura 21: Temperatura en los cuatro cilindros con EGR LP

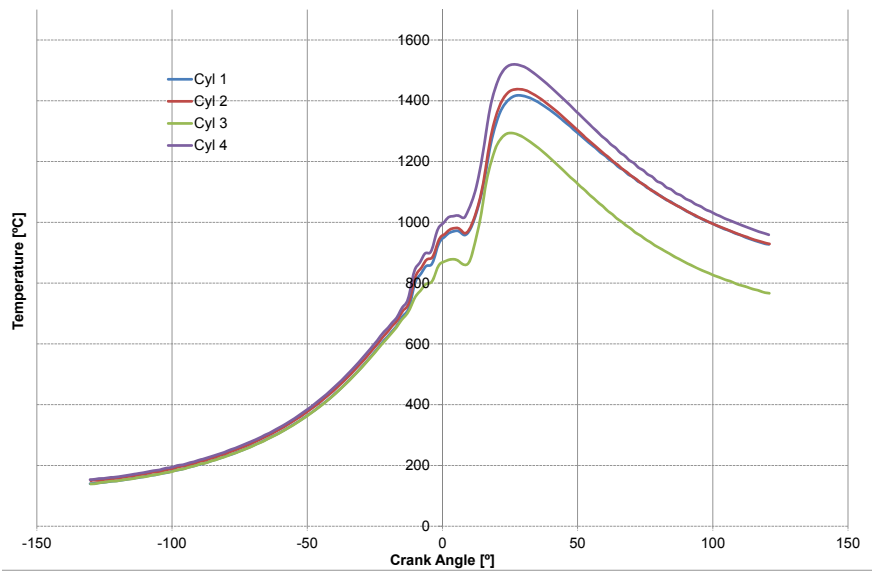


Figura 22: Temperatura en los cuatro cilindros con EGR HP

1.2.2. Presión en los cuatro cilindros:

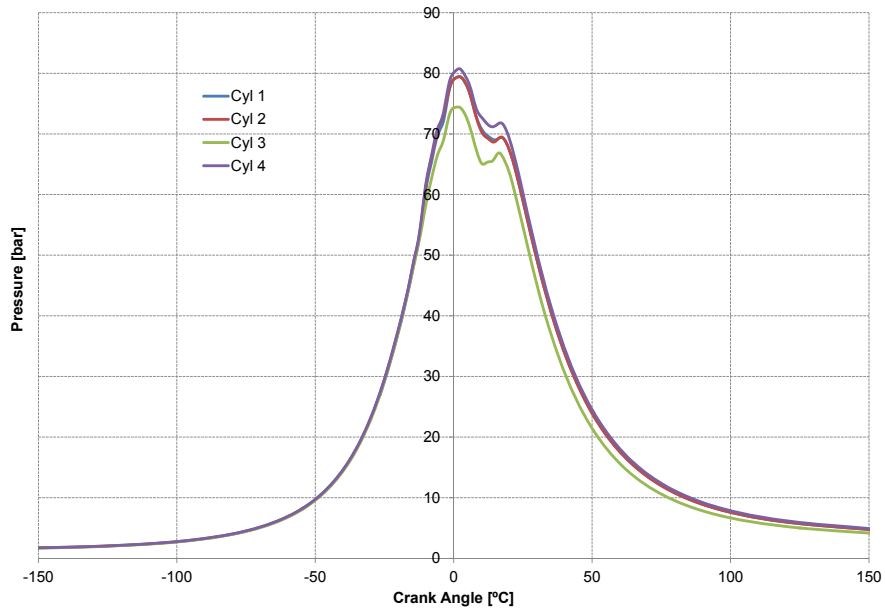


Figura 23: Presión en los cuatro cilindros con EGR LP

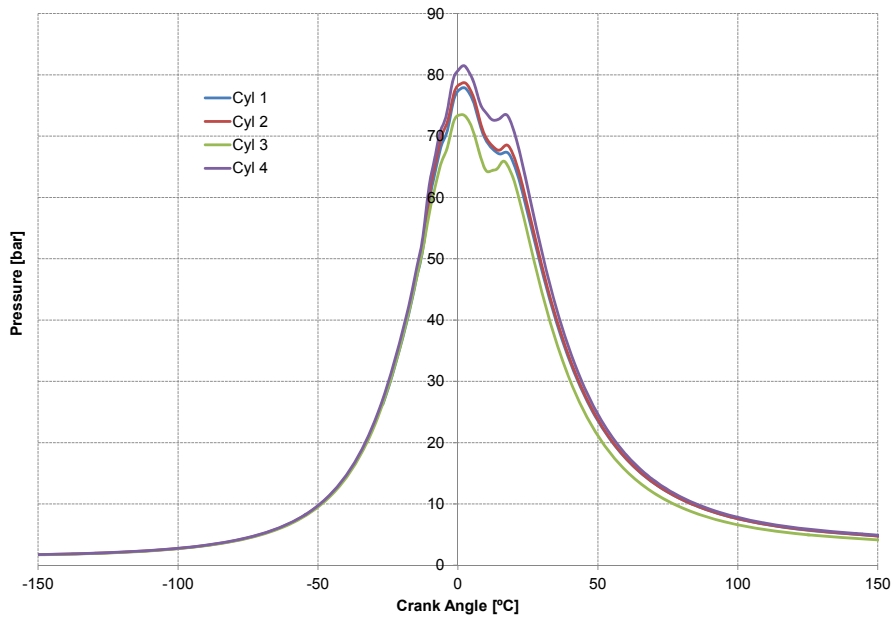


Figura 24: Presión en los cuatro cilindros con EGR HP

1.3. Comparativa LP/HP por Cilindro

1.3.1. Temperatura:

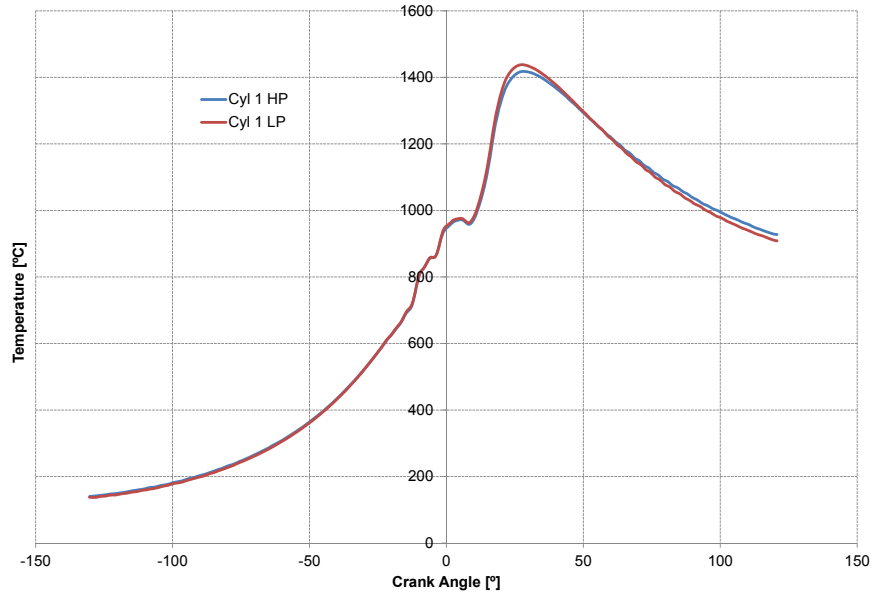


Figura 25: Temperaturas de combustión en el cilindro 1

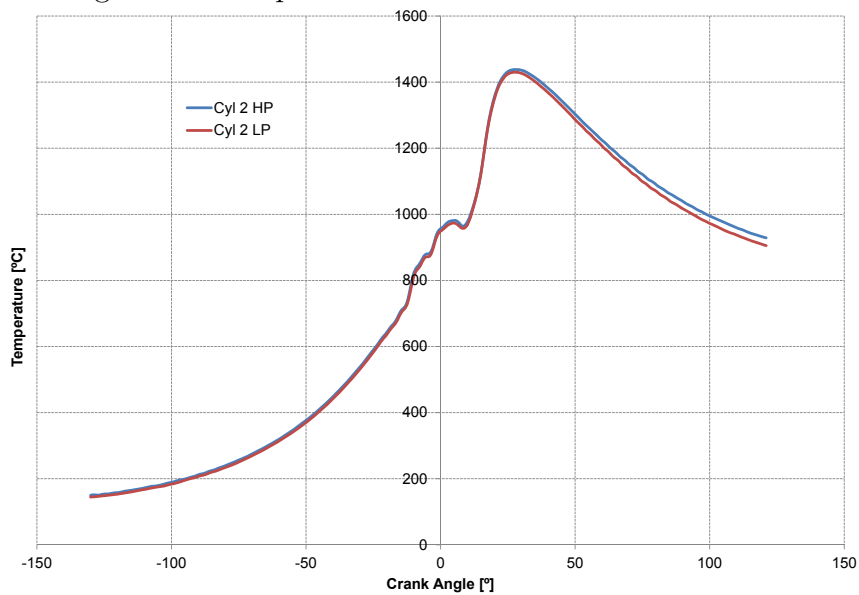


Figura 26: Temperaturas de combustión en el cilindro 2

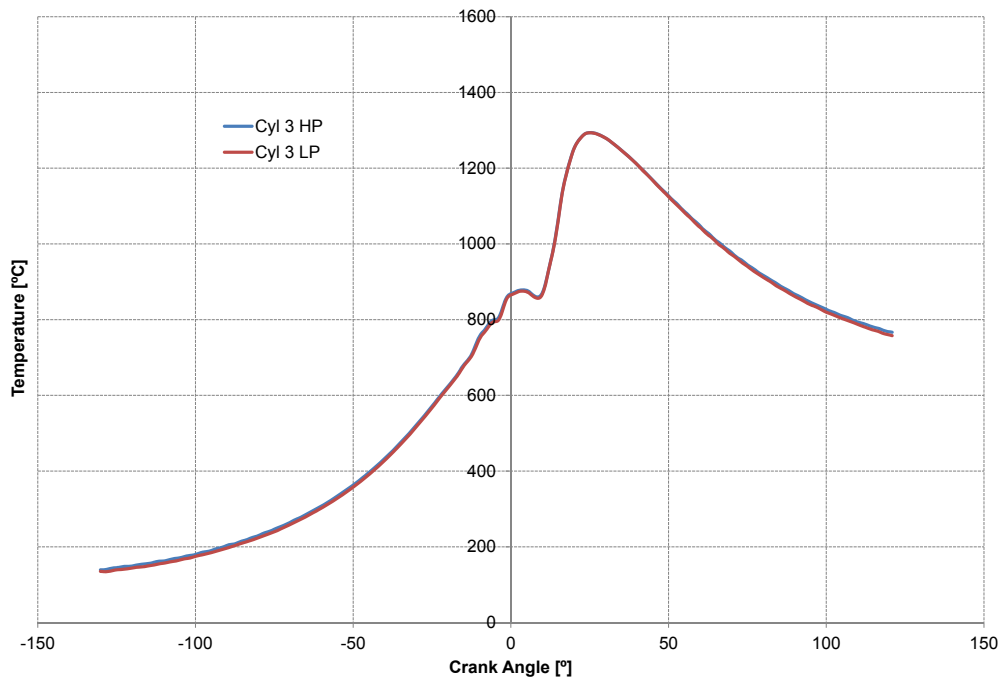


Figura 27: Temperaturas de combustión en el cilindro 3

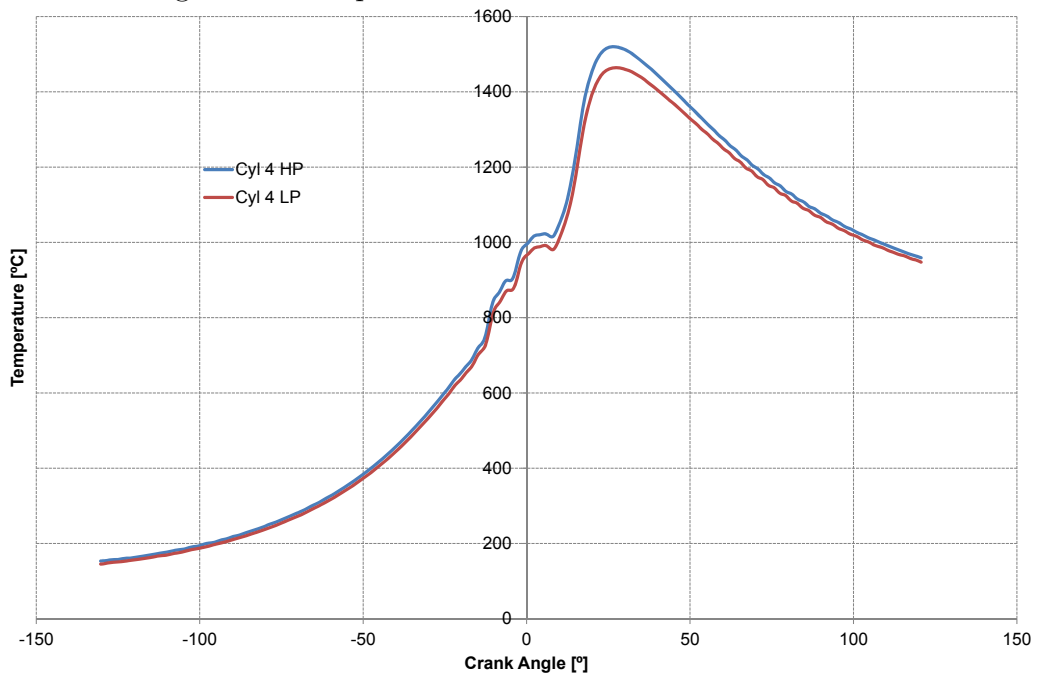


Figura 28: Temperaturas de combustión en el cilindro 4

1.3.2. Presión:

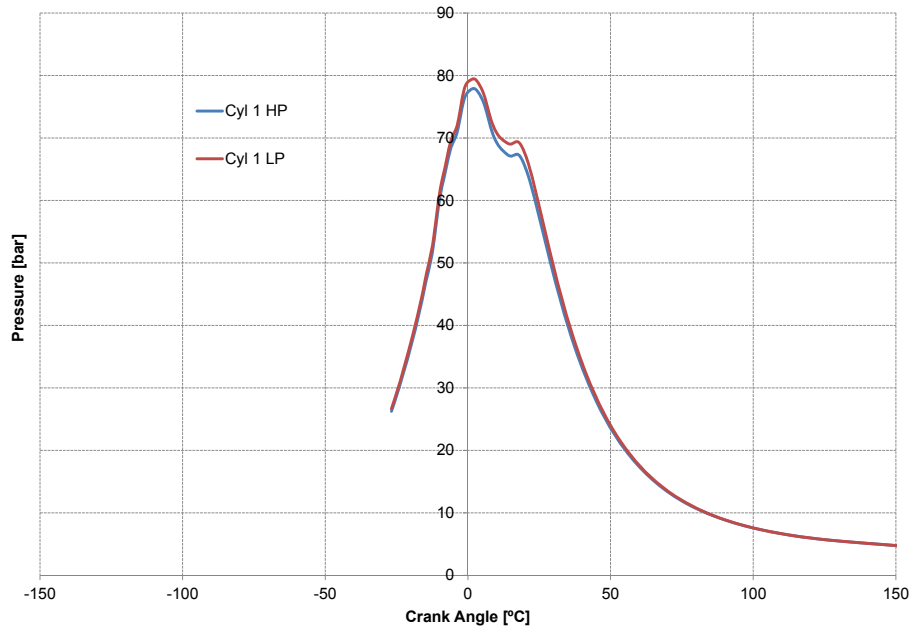


Figura 29: Presiones de combustión en el cilindro 1

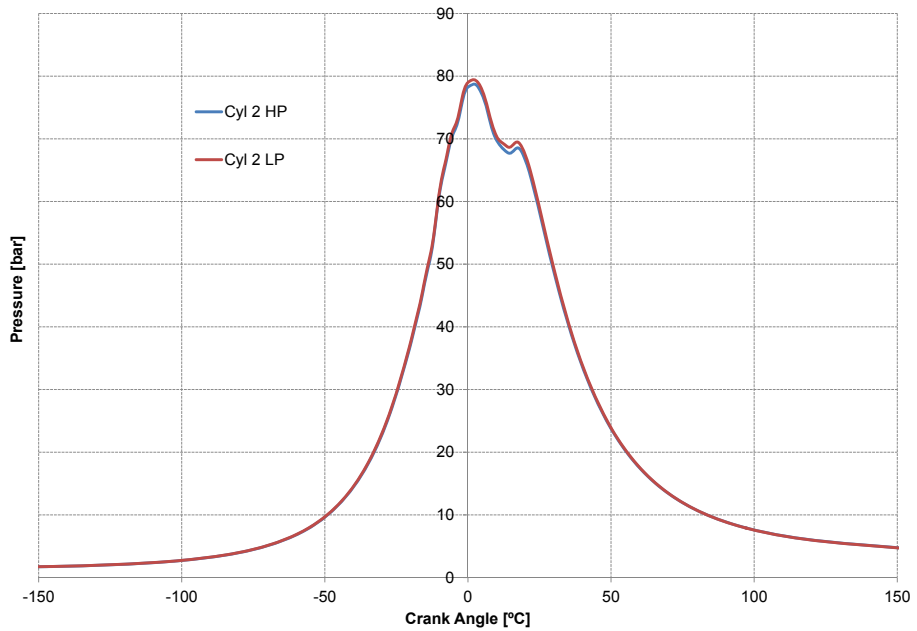


Figura 30: Presiones de combustión en el cilindro 2

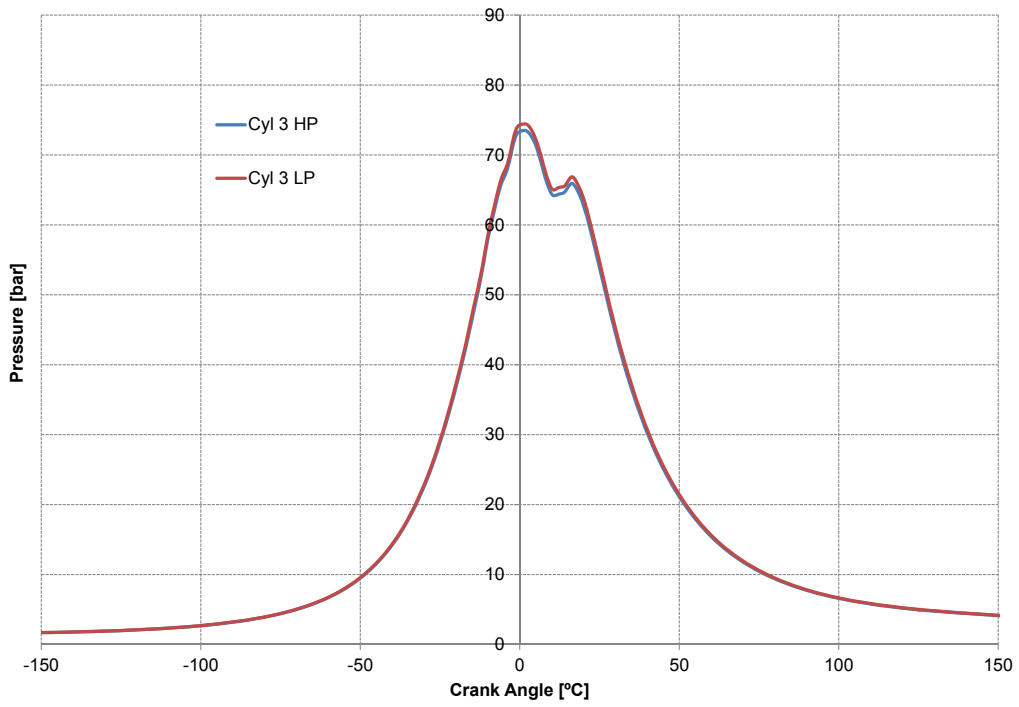


Figura 31: Presiones de combustión en el cilindro 3

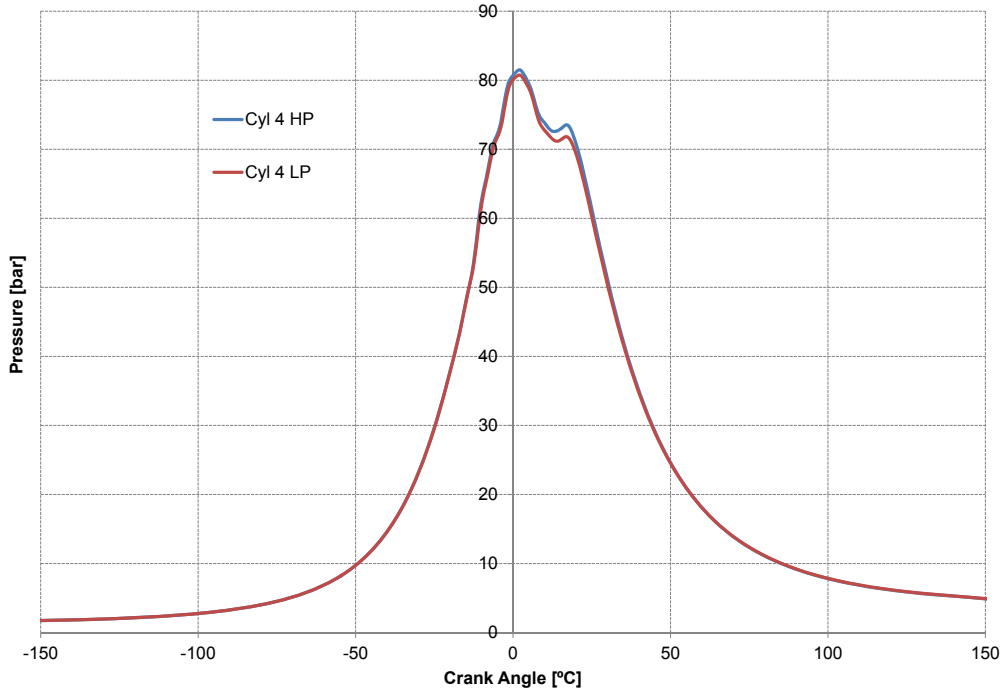


Figura 32: Presiones de combustión en el cilindro 4

1.3.3. $FQL/DFQL$:

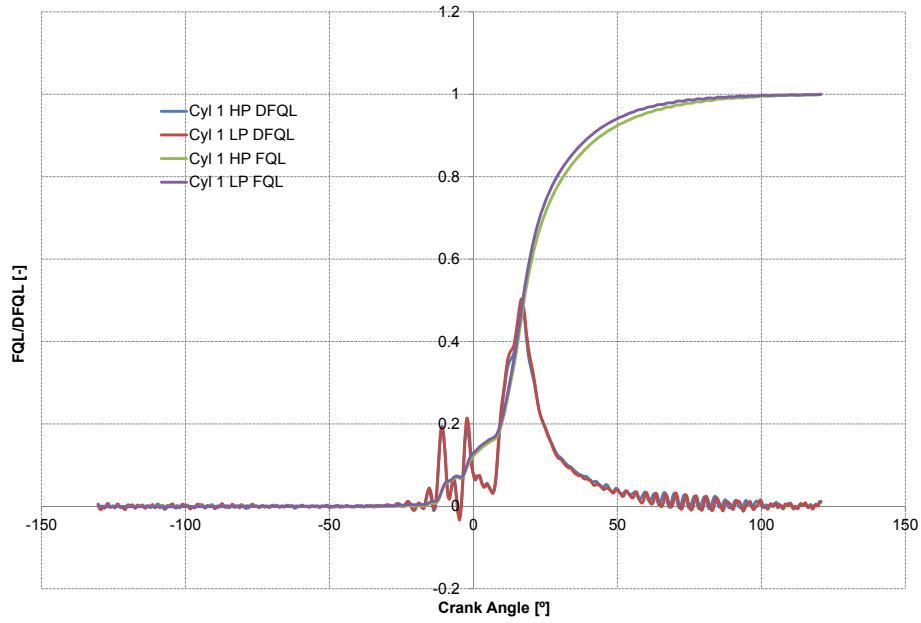


Figura 33: Fracción de calor liberado en el cilindro 1

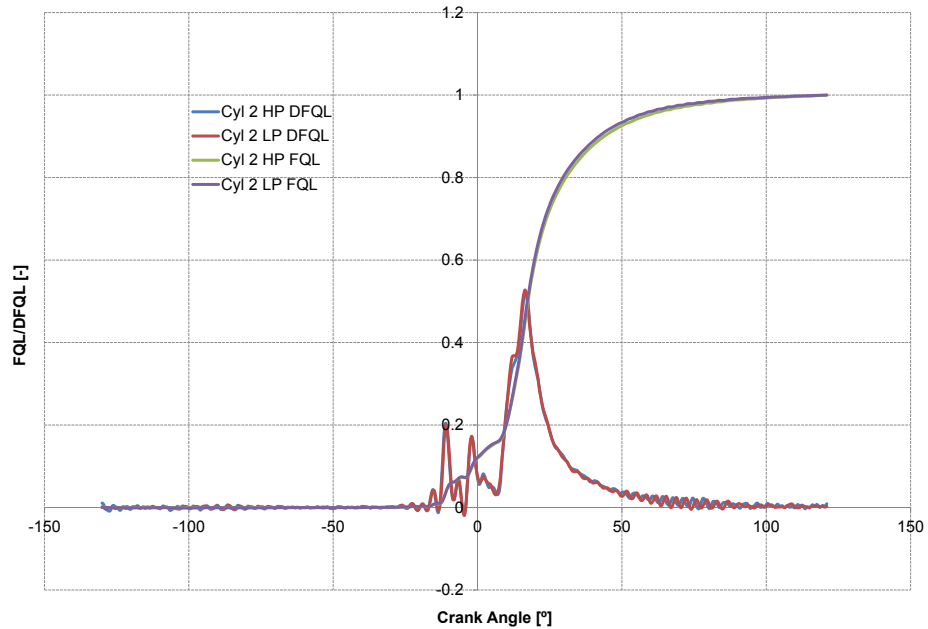


Figura 34: Fracción de calor liberado en el cilindro 2

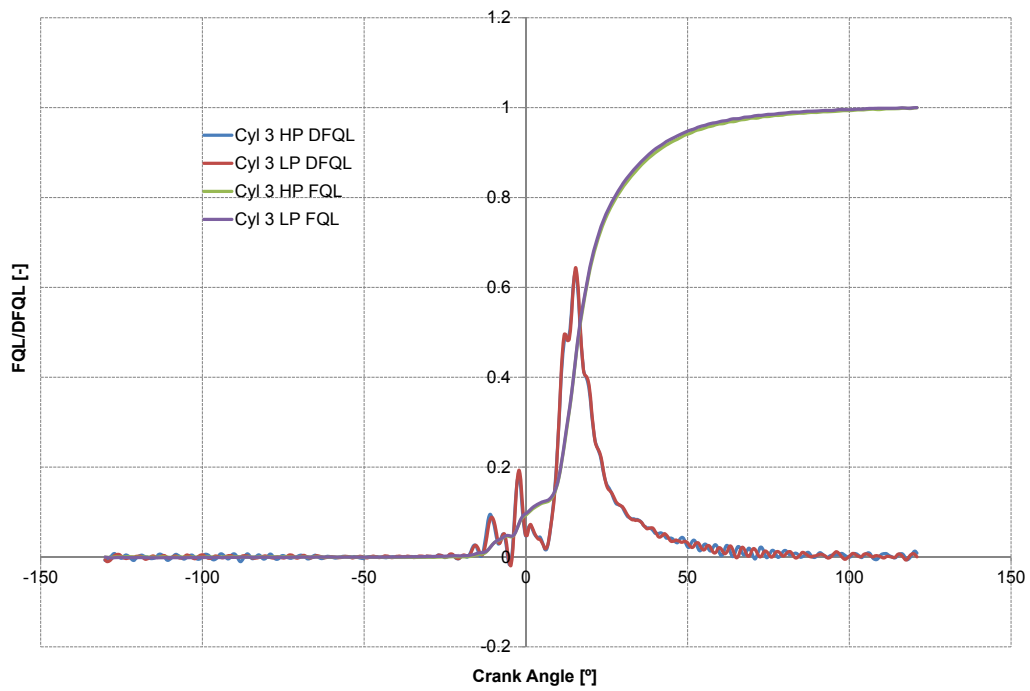


Figura 35: Fracción de calor liberado en el cilindro 3

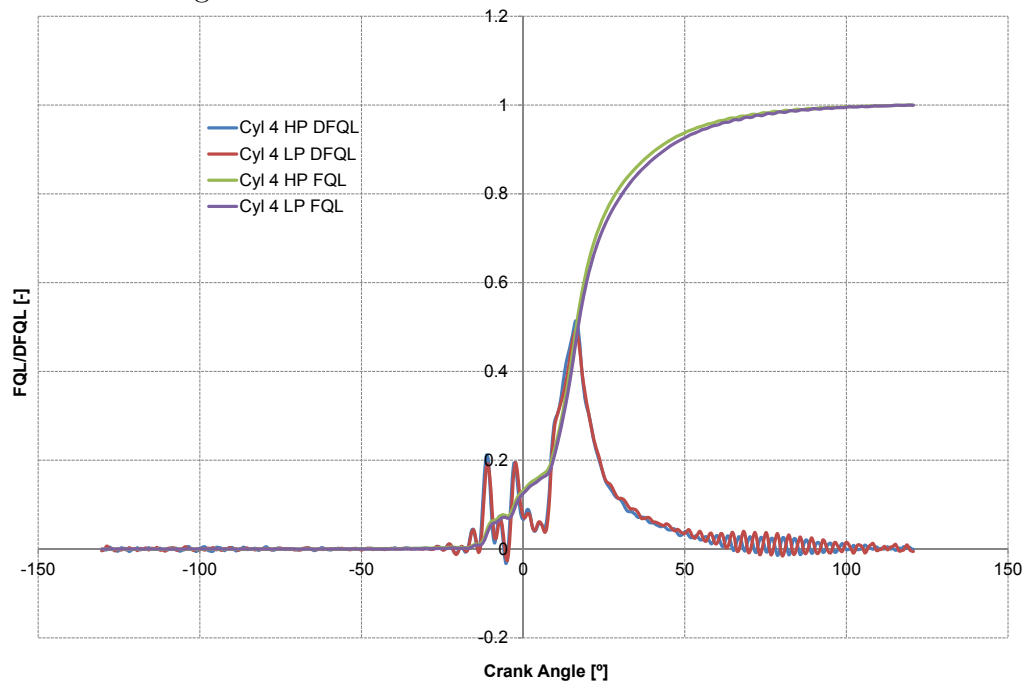


Figura 36: Fracción de calor liberado en el cilindro 4

2. PLACA OPTIMIZADA

Para esta configuración de la admisión se ha dispuesto la placa que se diseñó tras el estudio del comportamiento del flujo mediante CFD. Dicha placa consta de orificios de diferentes geometrías para compensar el reparto desigual del flujo a la entrada de las cámaras de combustión.

La placa en cuestión se muestra en la figura 5.

2.1. Condiciones de Ensayo y Parámetros de Combustión

En la figura 37 se muestran los datos de mayor interés emparejados por cilindro para el EGR de baja presión frente al de alta presión de forma análoga al caso de placa no optimizada.

PLACA ÓPTIMA															
PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN										RENDIMIENTO					
		Inicio	Retraso	P máx		T máx	dFQL máx	mf 50%	mf 90%	Duración	Wi	Pmi	Ni	ηi	
		Grados	Grados	Bar	°C	Grados		Grados	Grados	Grados	J	Bar	kW	%	
Cil 1	LP	-17.21	4.73	77.95	-0.69	1471.00	-1.60	16.70	17.20	42.20	59.13	470.95	9.43	9.03	45.08
	HP	-17.29	4.62	77.26		1469.40		16.70	17.70	41.70	58.96	470.27	9.42	9.02	46.08
Cil 2	LP	-17.10	4.83	78.79	0.07	1469.00	12.30	16.97	17.47	43.47	60.23	466.26	9.34	8.94	44.63
	HP	-16.80	5.11	78.86		1481.30		16.97	17.47	44.47	60.84	473.44	9.48	9.08	46.39
Cil 3	LP	-18.11	3.82	73.16	0.06	1315.50	21.70	15.39	16.39	39.89	57.97	385.40	7.72	7.39	36.89
	HP	-18.11	3.80	73.22		1337.20		16.39	16.39	38.39	56.43	390.42	7.82	7.49	38.26
Cil 4	LP	-17.33	4.61	80.10	1.39	1510.00	57.20	16.18	17.18	46.18	63.06	490.08	9.81	9.40	46.91
	HP	-17.24	4.68	81.49		1567.20		16.18	16.68	42.18	59.23	507.26	10.16	9.73	49.71

Figura 37: Parámetros de combustión y rendimiento

2.2. Comparativa Global EGR LP y HP

2.2.1. Temperatura en los cuatro cilindros:

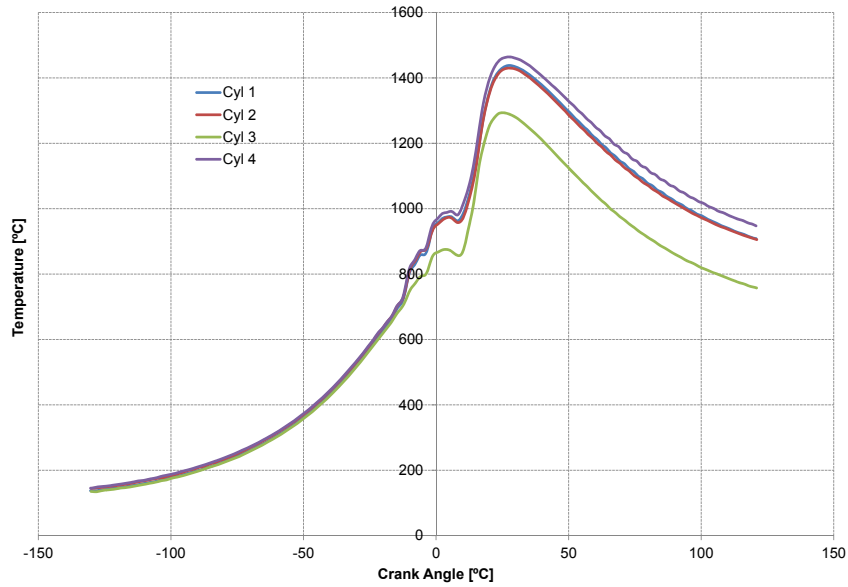


Figura 38: Temperatura en los cuatro cilindros con EGR LP

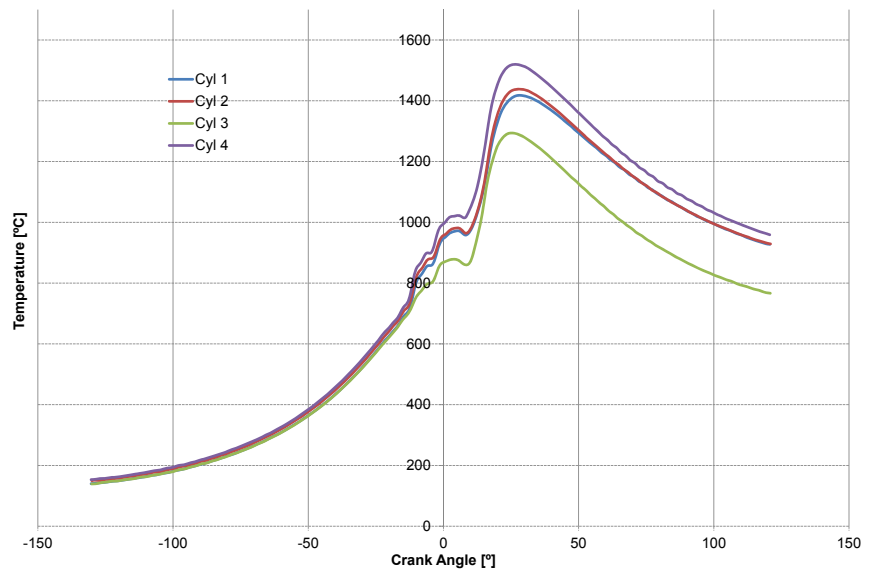


Figura 39: Temperatura en los cuatro cilindros con EGR HP

2.2.2. Presión en los cuatro cilindros:

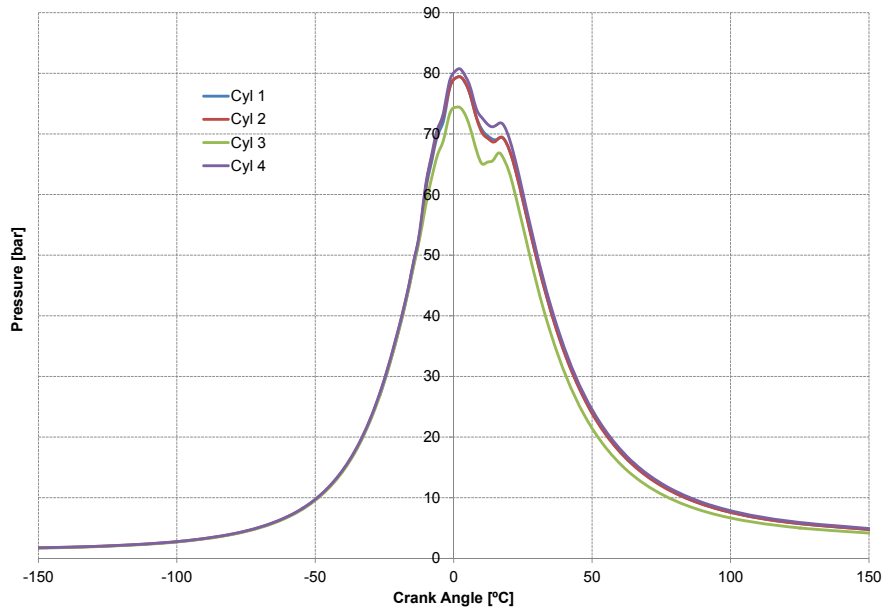


Figura 40: Presión en los cuatro cilindros con EGR LP

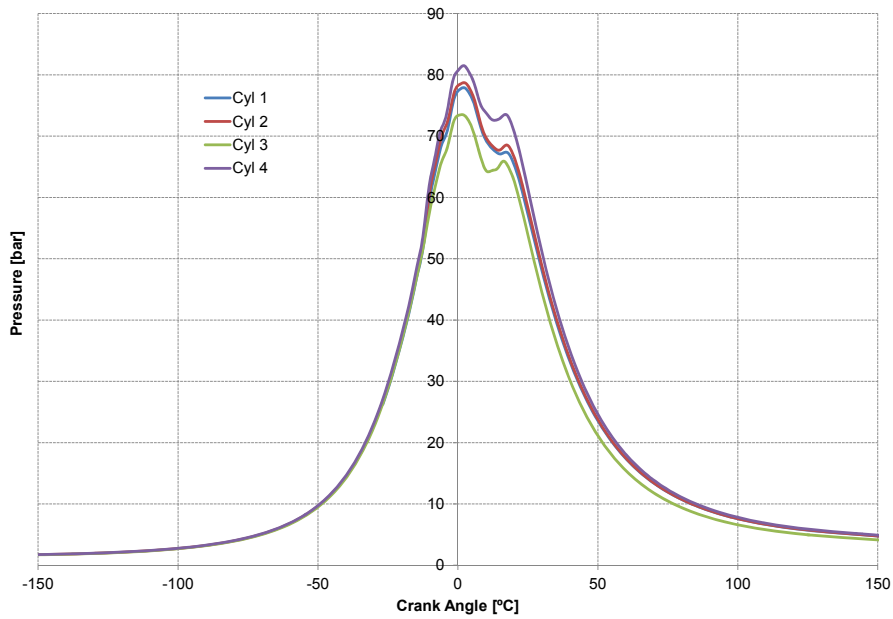


Figura 41: Presión en los cuatro cilindros con EGR HP

2.3. Comparativa LP/HP por Cilindro

2.3.1. Temperatura:

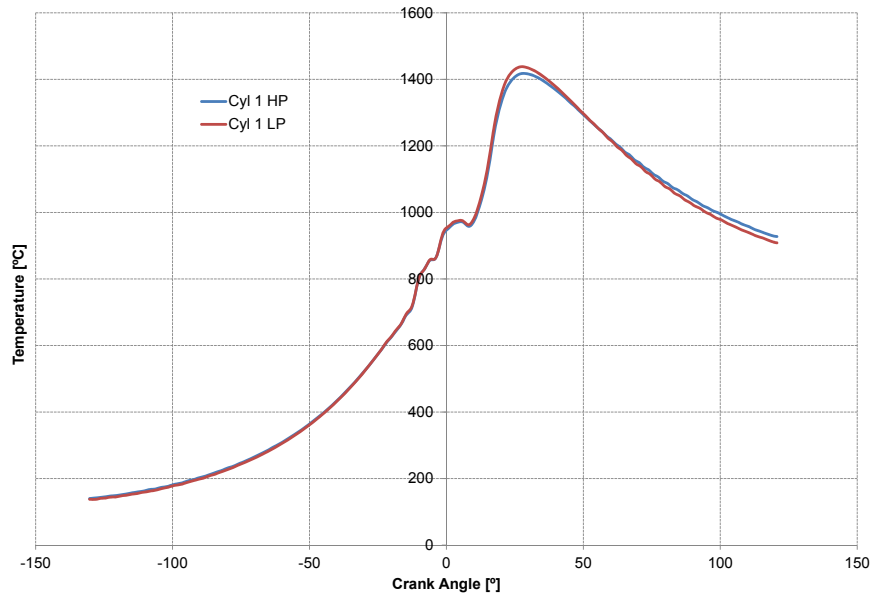


Figura 42: Temperaturas de combustión en el cilindro 1

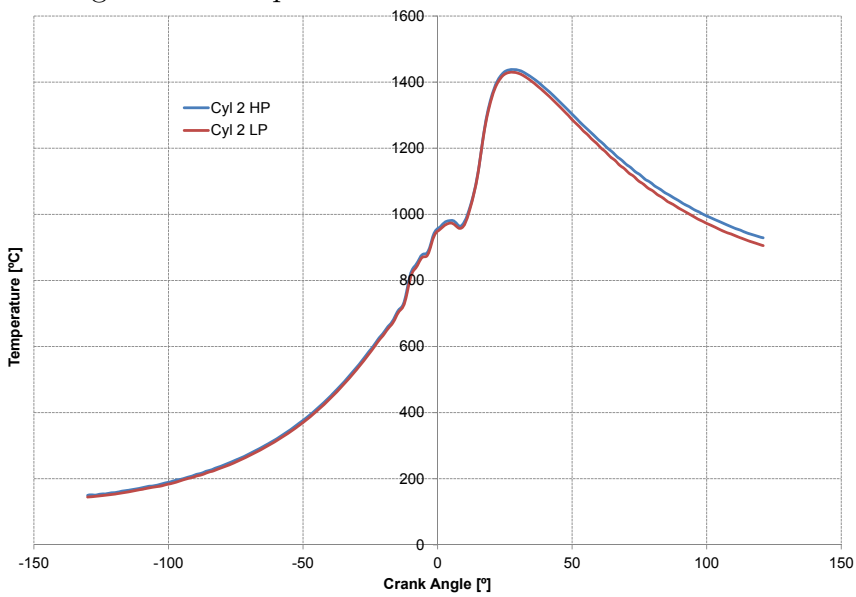


Figura 43: Temperaturas de combustión en el cilindro 2

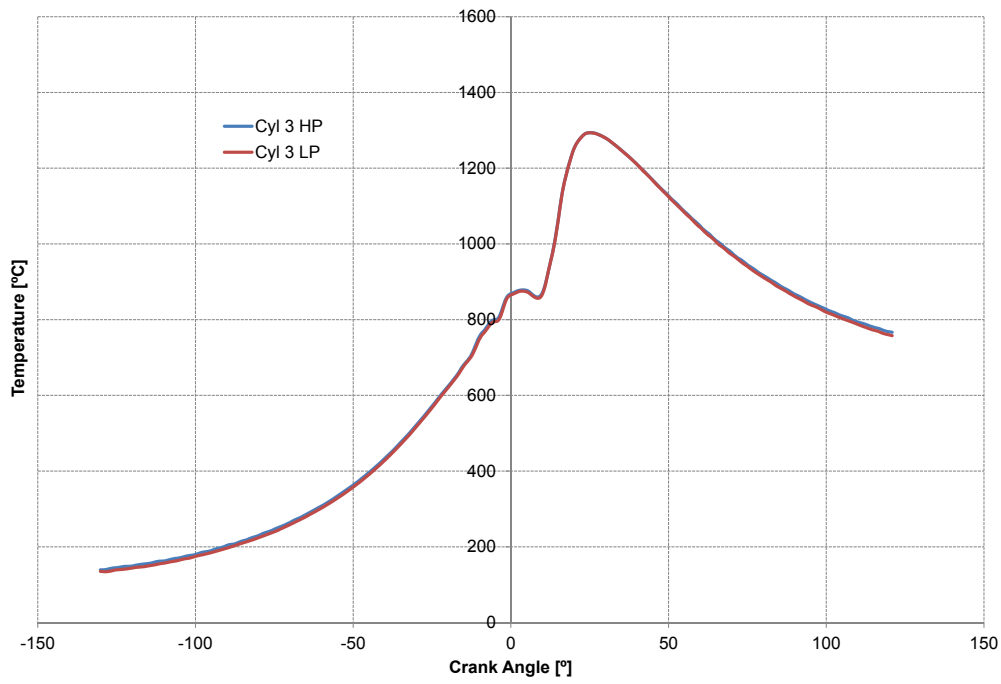


Figura 44: Temperaturas de combustión en el cilindro 3

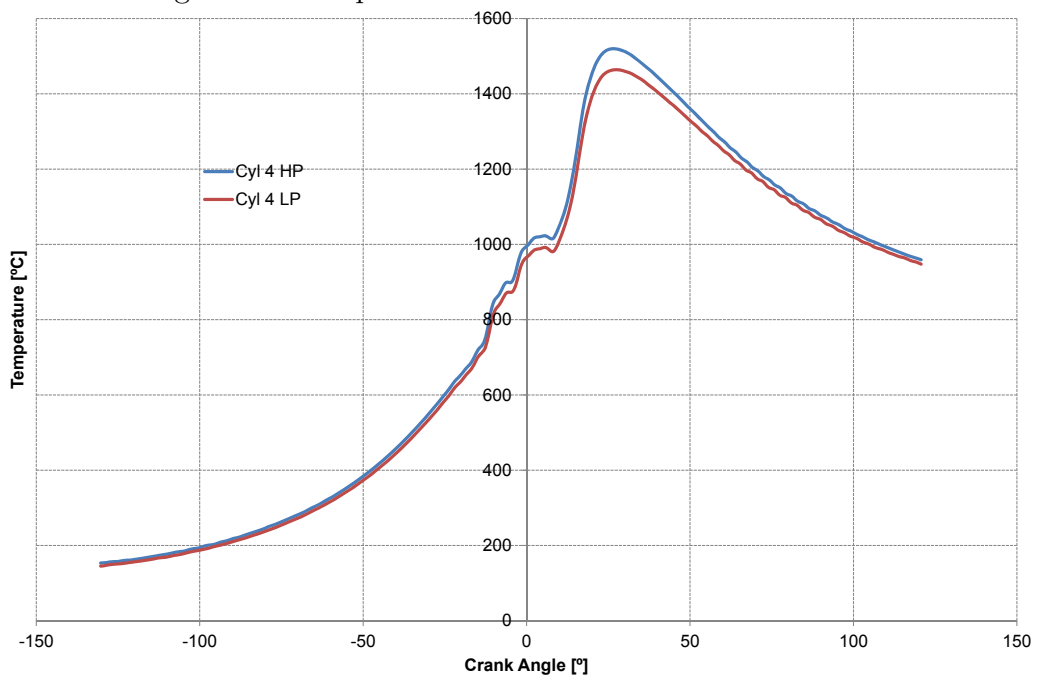


Figura 45: Temperaturas de combustión en el cilindro 4

2.3.2. Presión:

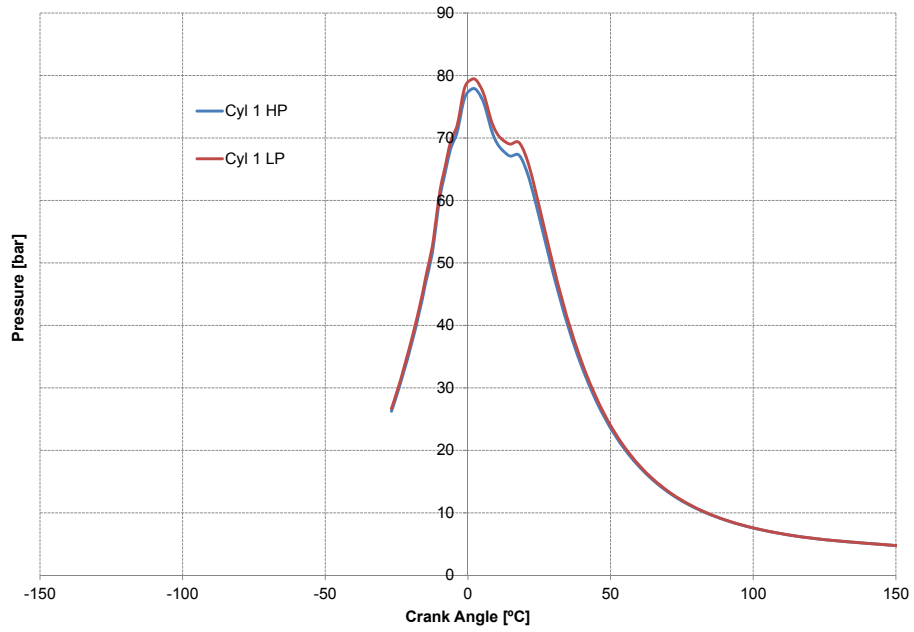


Figura 46: Presiones de combustión en el cilindro 1

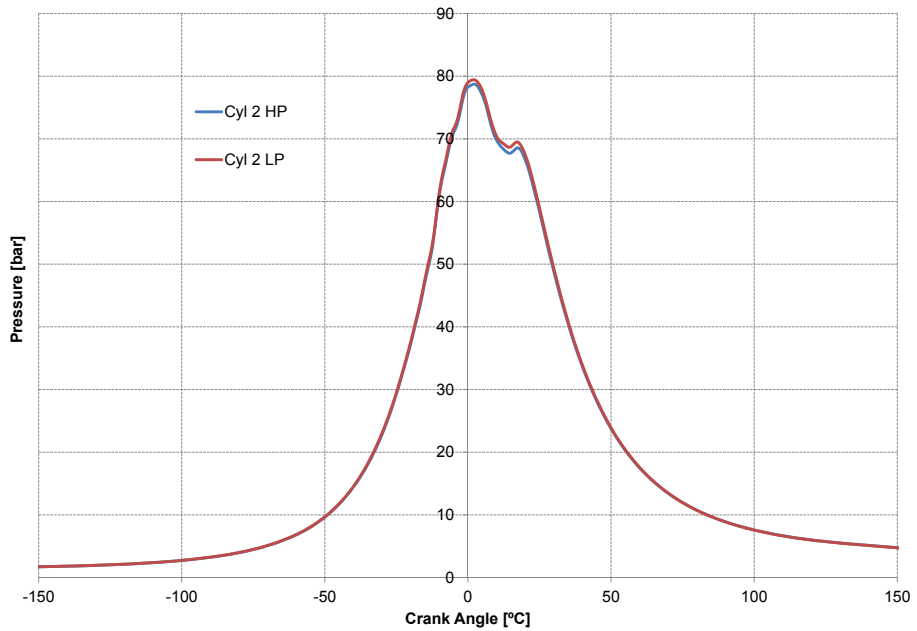


Figura 47: Presiones de combustión en el cilindro 2

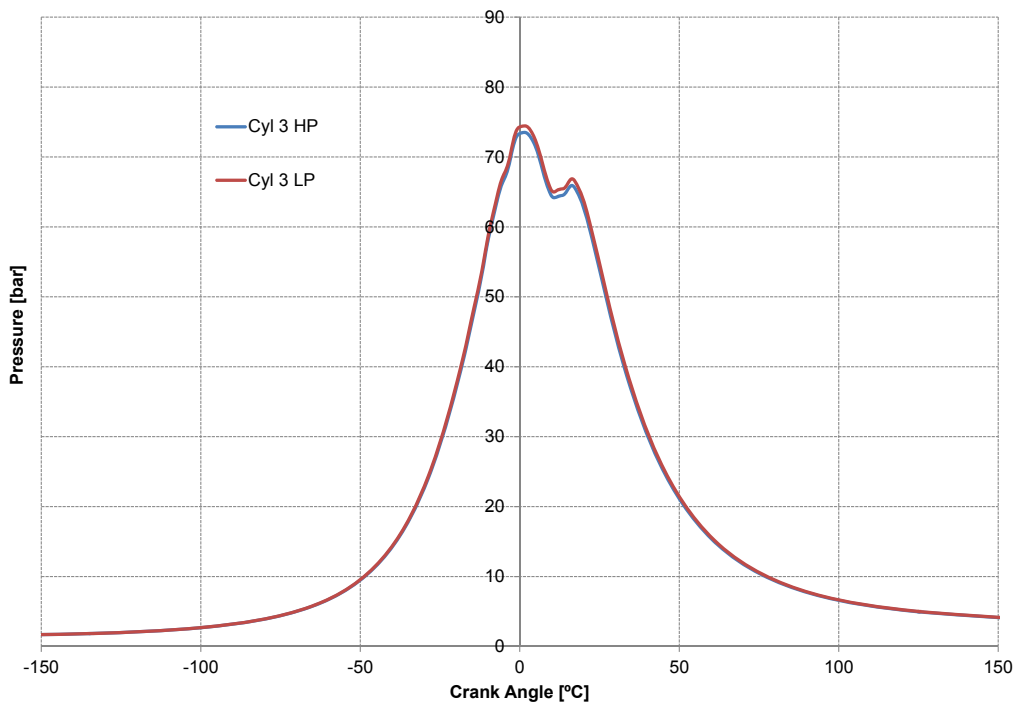


Figura 48: Presiones de combustión en el cilindro 3

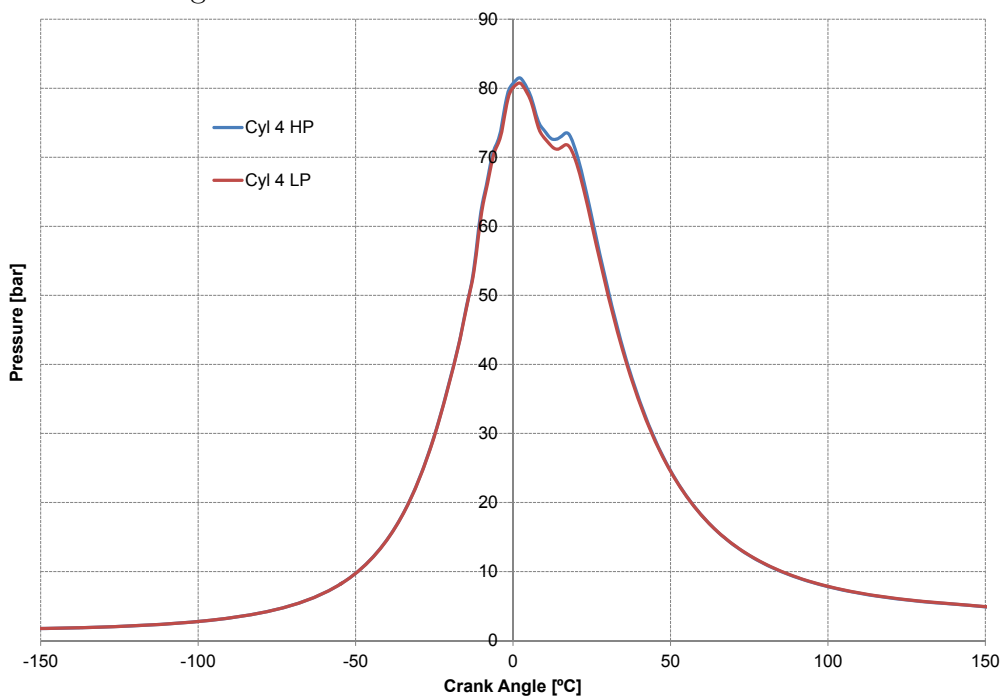


Figura 49: Presiones de combustión en el cilindro 4

2.3.3. $FQL/DFQL$:

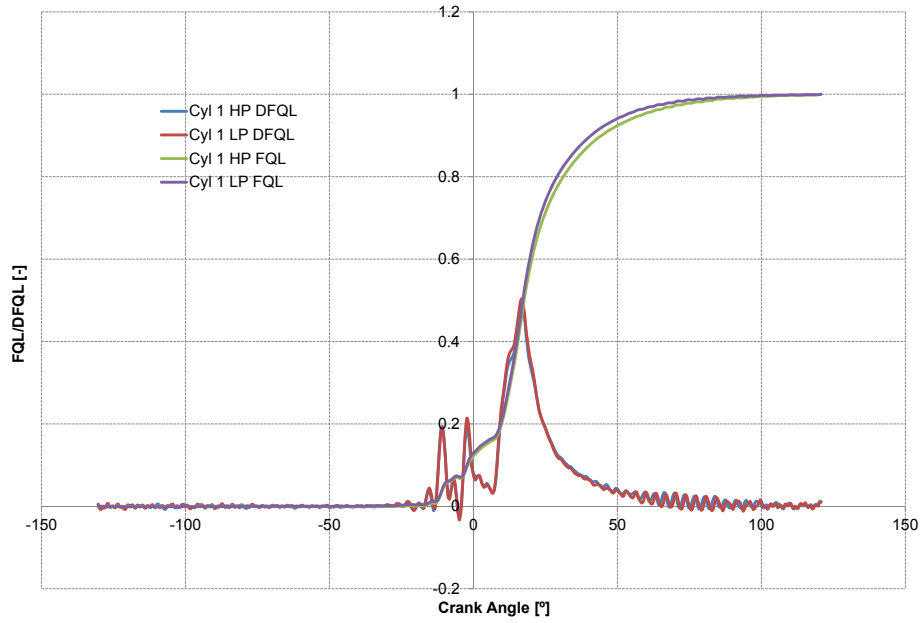


Figura 50: Fracción de calor liberado en el cilindro 1

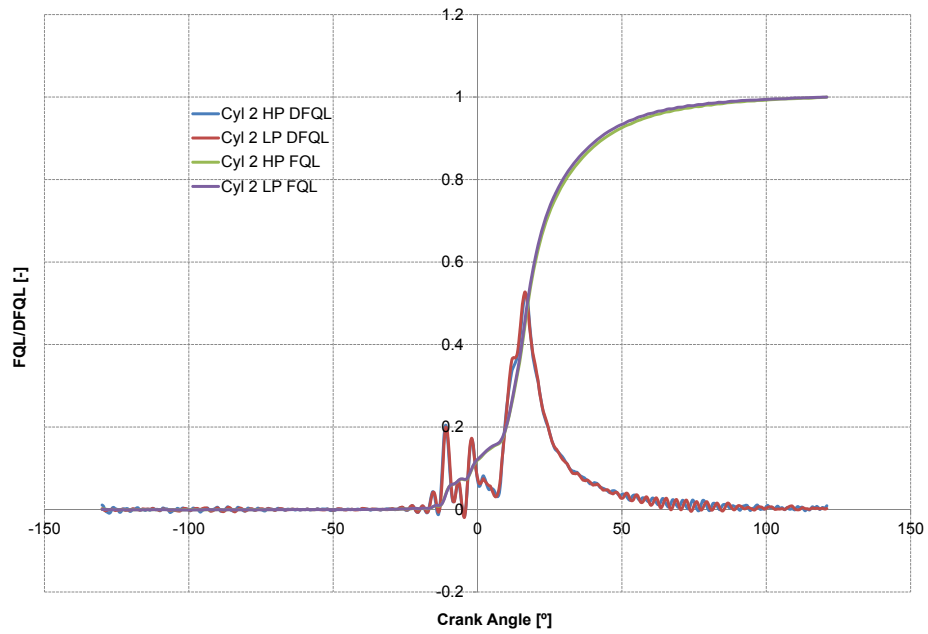


Figura 51: Fracción de calor liberado en el cilindro 2

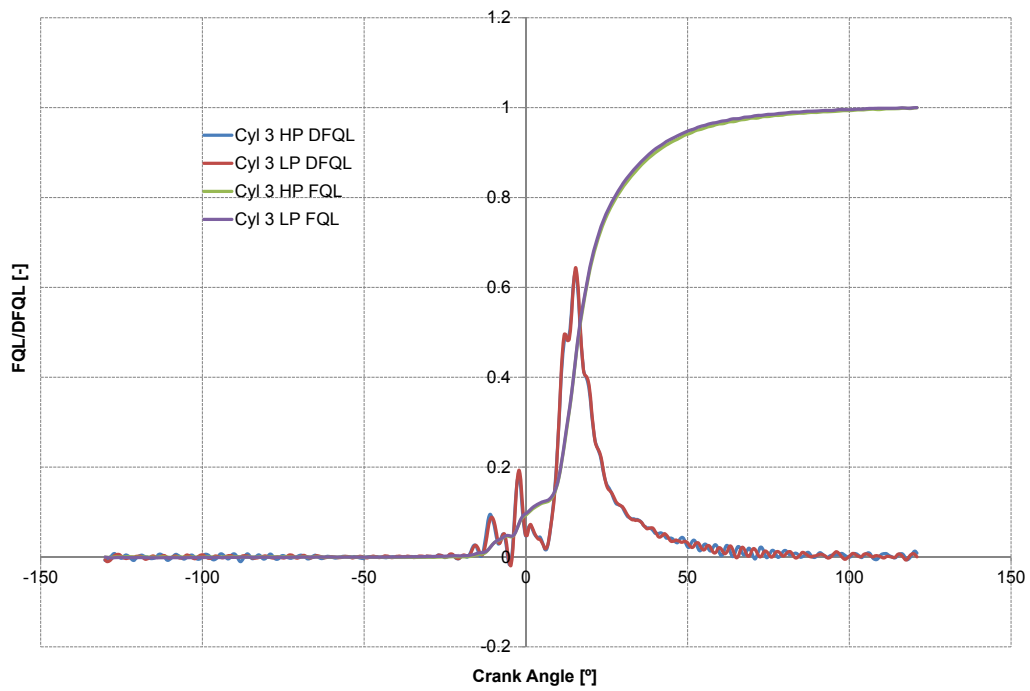


Figura 52: Fracción de calor liberado en el cilindro 3

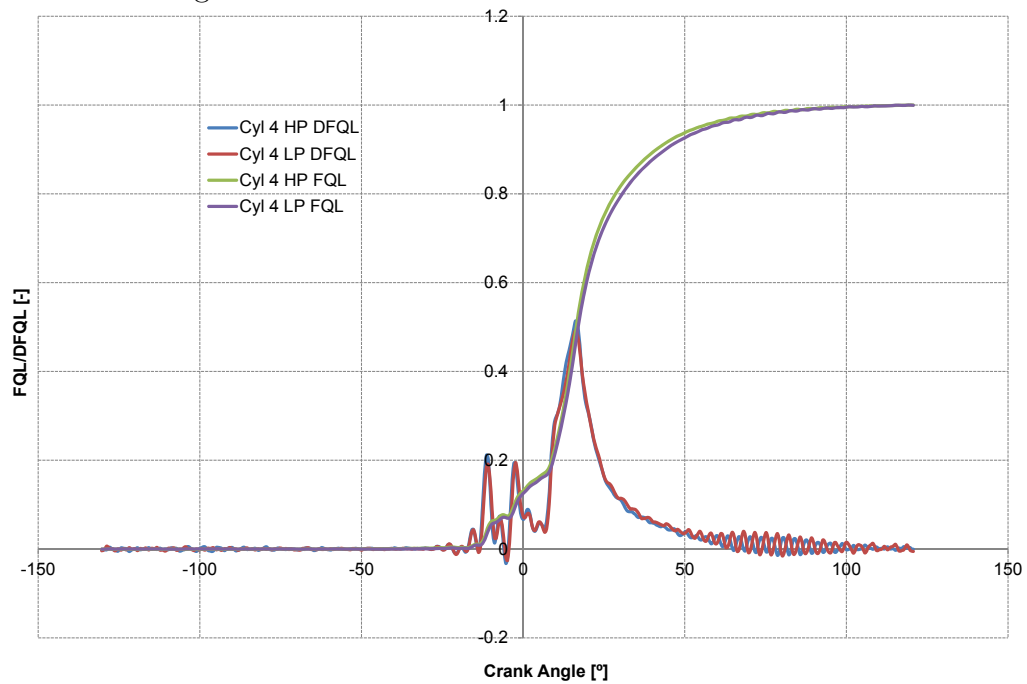


Figura 53: Fracción de calor liberado en el cilindro 4

3. ADMISIÓN SIN PLACA

Para esta configuración de la admisión se ha retirado cualquier restricción geométrica en la admisión para que el flujo entre de forma libre. Con esto se consigue que el flujo se reparta entre cada uno de los cilindros según su propia dinámica.

3.1. Condiciones de Ensayo y Parámetros de Combustión

En la figura 54 se incide de nuevo en los valores significativos que servirán de complemento a las gráficas aportadas en la parte final de este trabajo.

SIN PLACA															
PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN											RENDIMIENTO				
		Inicio	Retraso	P máx		T máx		dFQL máx	mf 50%	mf 90%	Duración	Wi	Pmi	Ni	ηi
		Grados	Grados	Bar		°C		Grados	Grados	Grados	Grados	J	Bar	kW	%
Cil 1	LP	-17.26	4.62	78.86	-0.80	1470.40	-4.70	16.70	17.20	41.70	58.87	478.03	9.57	9.17	46.71
	HP	-17.24	4.24	78.06		1465.70		16.70	17.70	43.61	60.85	472.97	9.47	9.07	45.90
Cil 2	LP	-17.21	4.67	79.74	-0.90	1475.20	9.30	16.97	17.47	43.47	60.57	479.83	9.61	9.20	46.88
	HP	-17.05	4.82	78.84		1484.50		16.97	17.97	44.47	61.20	477.07	9.55	9.15	46.30
Cil 3	LP	-18.11	3.76	73.98	-0.79	1315.90	-1.60	15.39	16.39	38.89	56.78	389.69	7.80	7.47	38.07
	HP	-18.11	3.76	73.19		1314.30		15.39	16.89	41.89	59.66	391.55	7.84	7.51	38.00
Cil 4	LP	-17.45	4.42	80.98	2.44	1512.60	117.00	16.18	17.18	43.68	61.08	501.63	10.05	9.62	49.01
	HP	-17.19	4.69	83.42		1629.60		16.18	16.18	37.68	54.46	523.59	10.49	10.04	50.81

Figura 54: Parámetros de combustión y rendimiento

3.2. Comparativa Global EGR LP y HP

3.2.1. Temperatura en los cuatro cilindros:

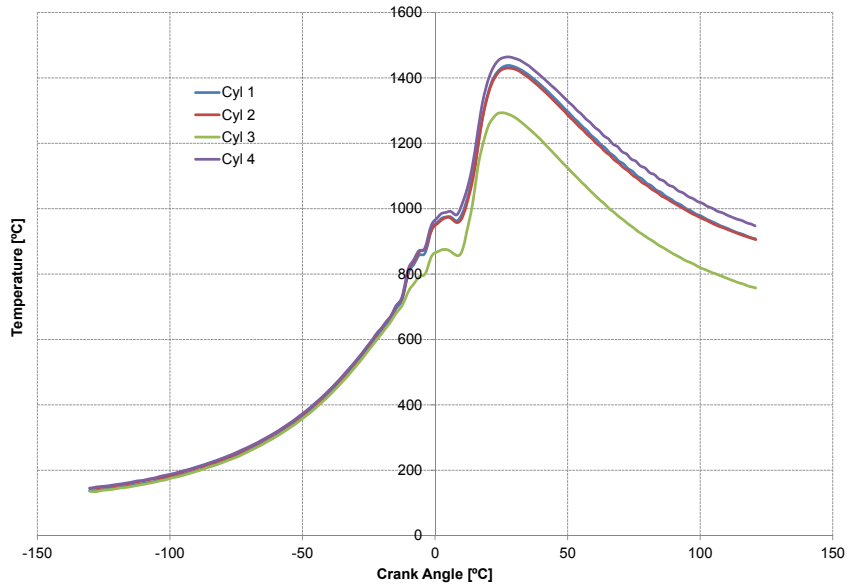


Figura 55: Temperatura en los cuatro cilindros con EGR LP

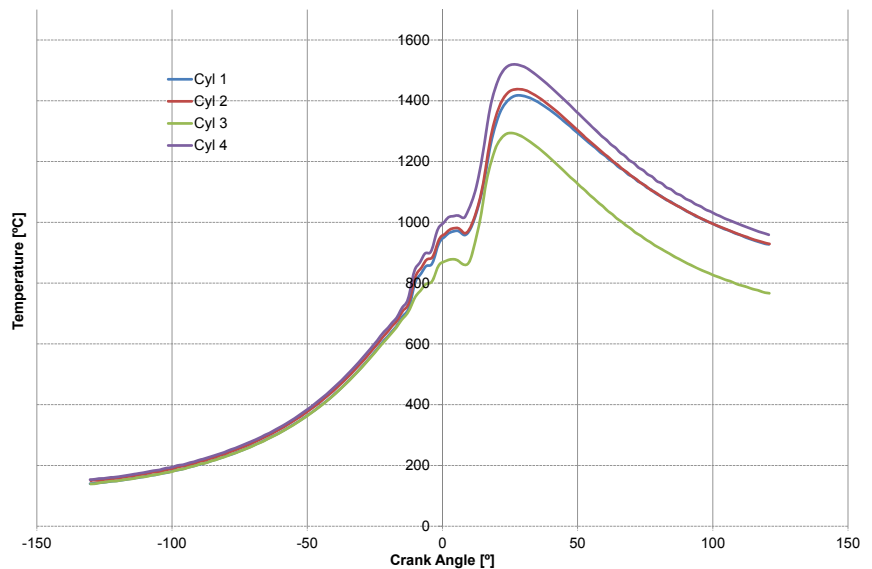


Figura 56: Temperatura en los cuatro cilindros con EGR HP

3.2.2. Presión en los cuatro cilindros:

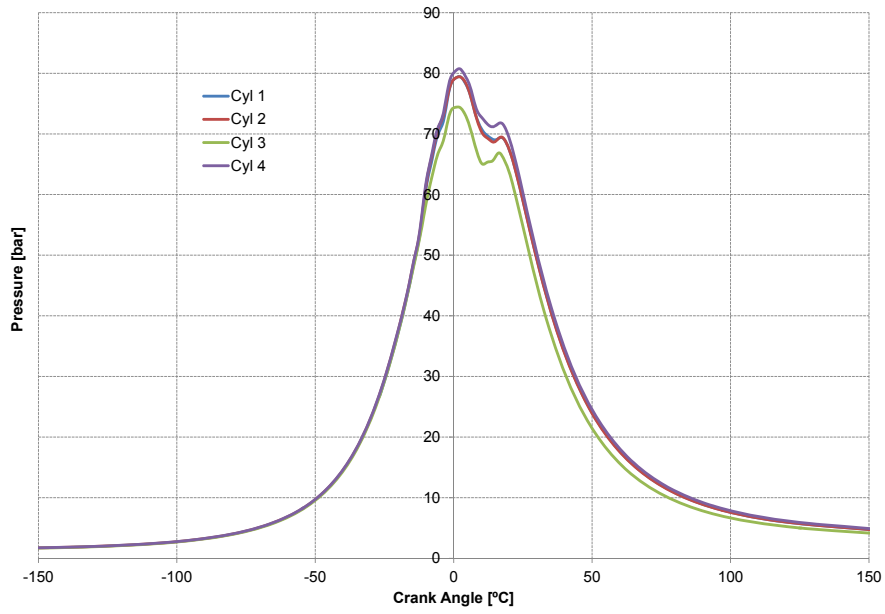


Figura 57: Presión en los cuatro cilindros con EGR LP

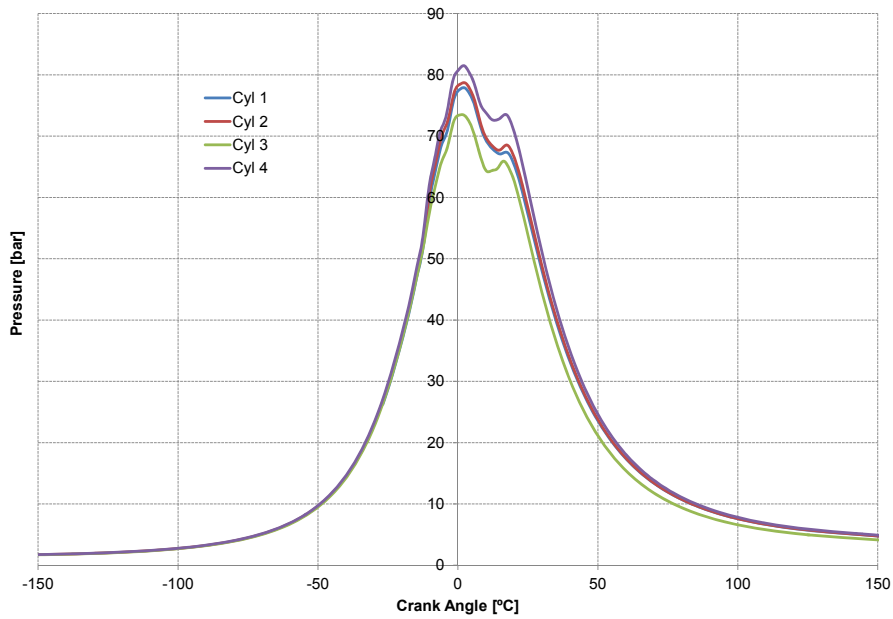


Figura 58: Presión en los cuatro cilindros con EGR HP

3.3. Comparativa LP/HP por Cilindro

3.3.1. Temperatura:

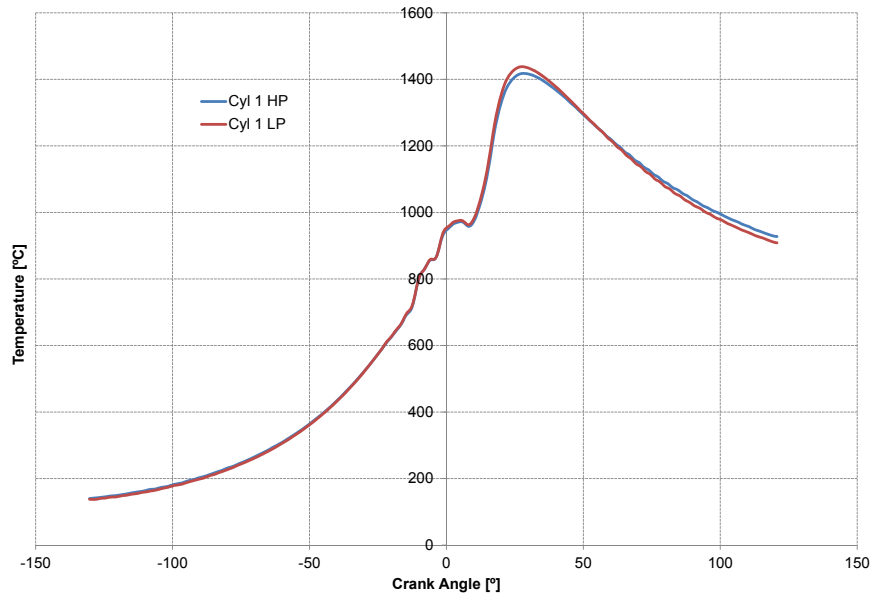


Figura 59: Temperaturas de combustión en el cilindro 1

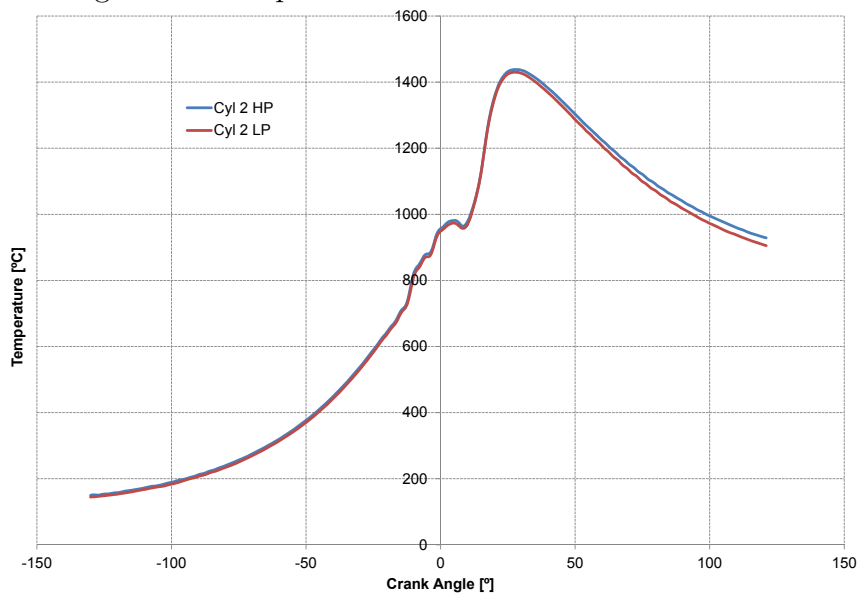


Figura 60: Temperaturas de combustión en el cilindro 2

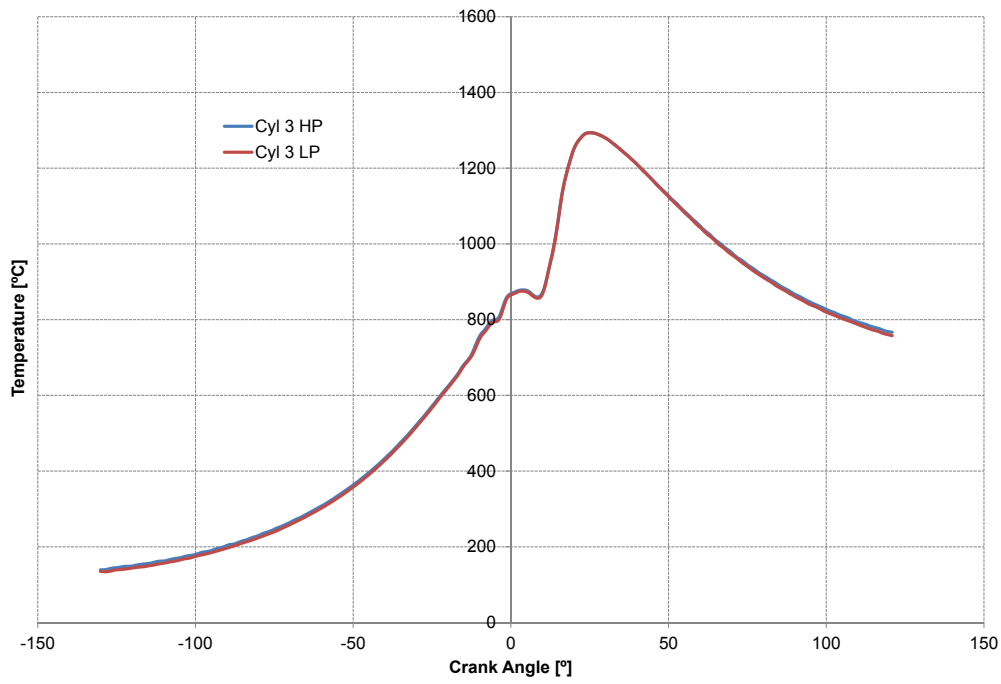


Figura 61: Temperaturas de combustión en el cilindro 3

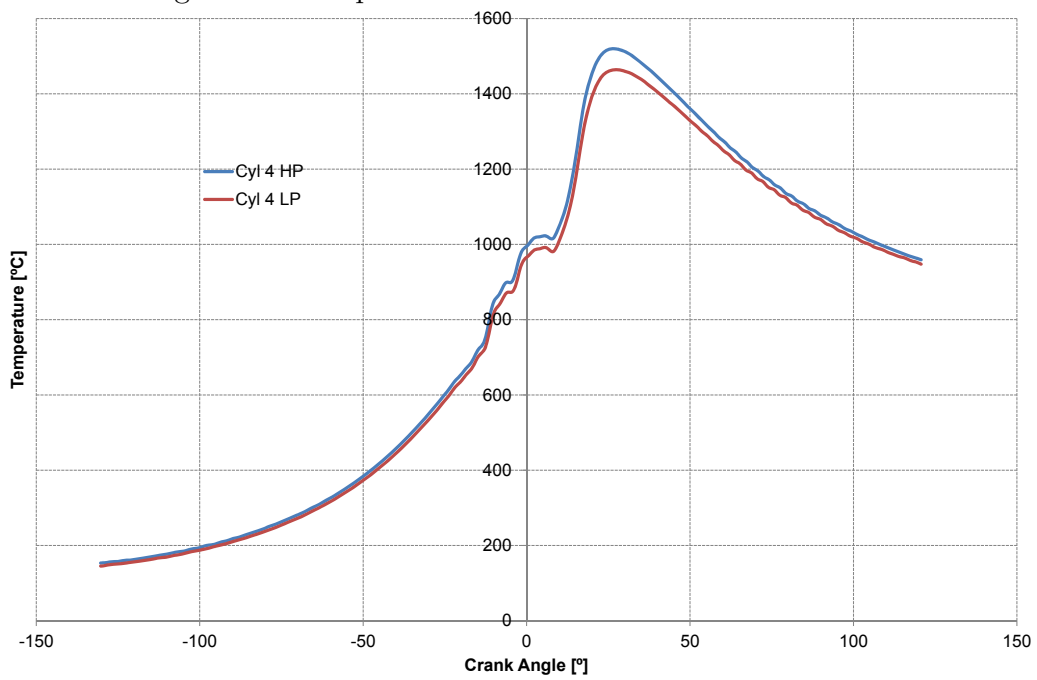


Figura 62: Temperaturas de combustión en el cilindro 4

3.3.2. Presión:

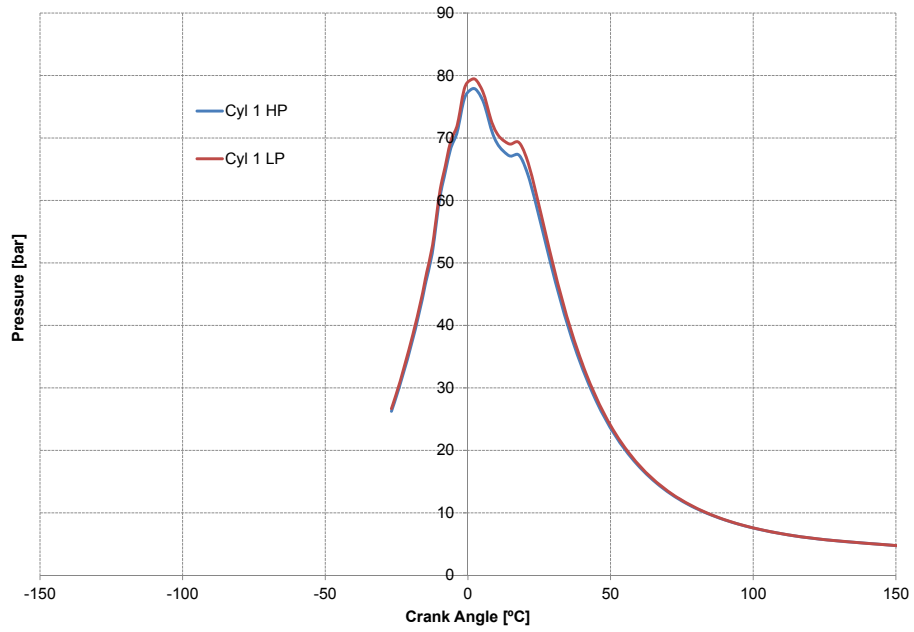


Figura 63: Presiones de combustión en el cilindro 1

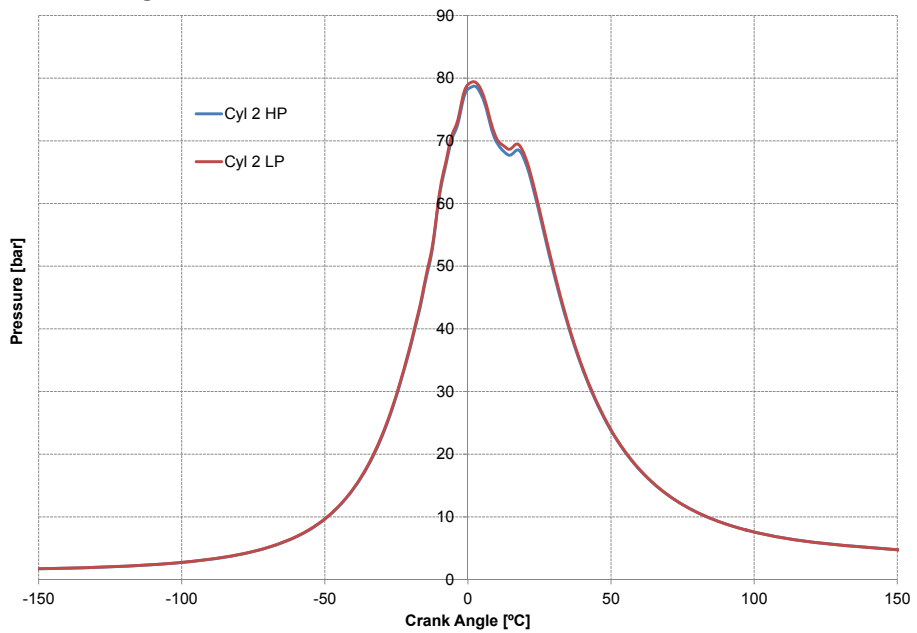


Figura 64: Presiones de combustión en el cilindro 2

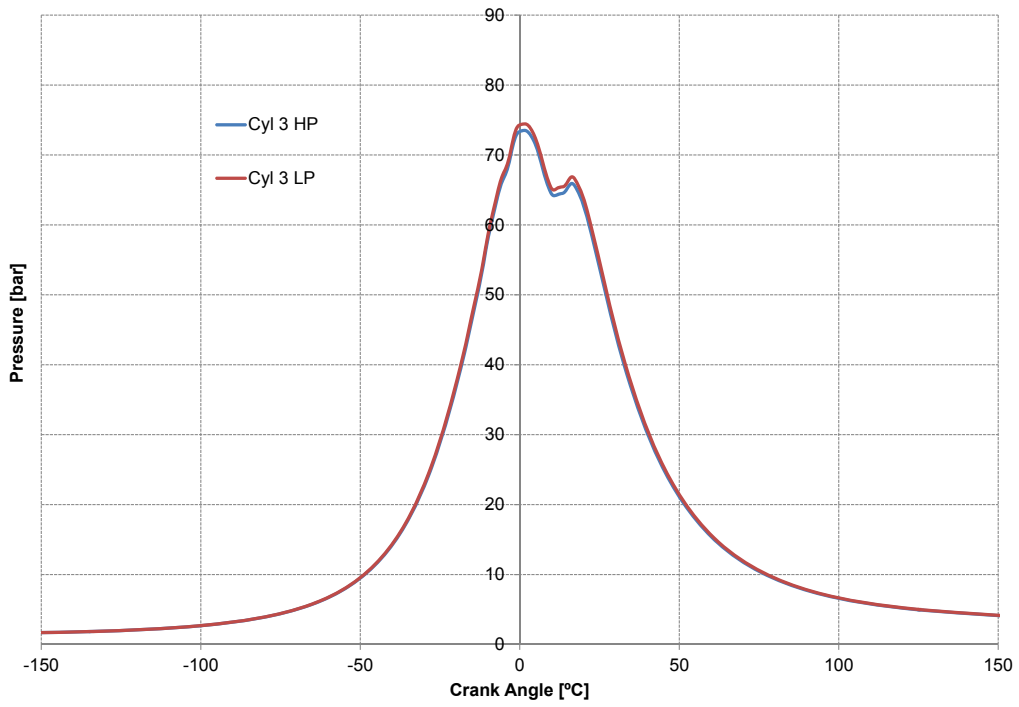


Figura 65: Presiones de combustión en el cilindro 3

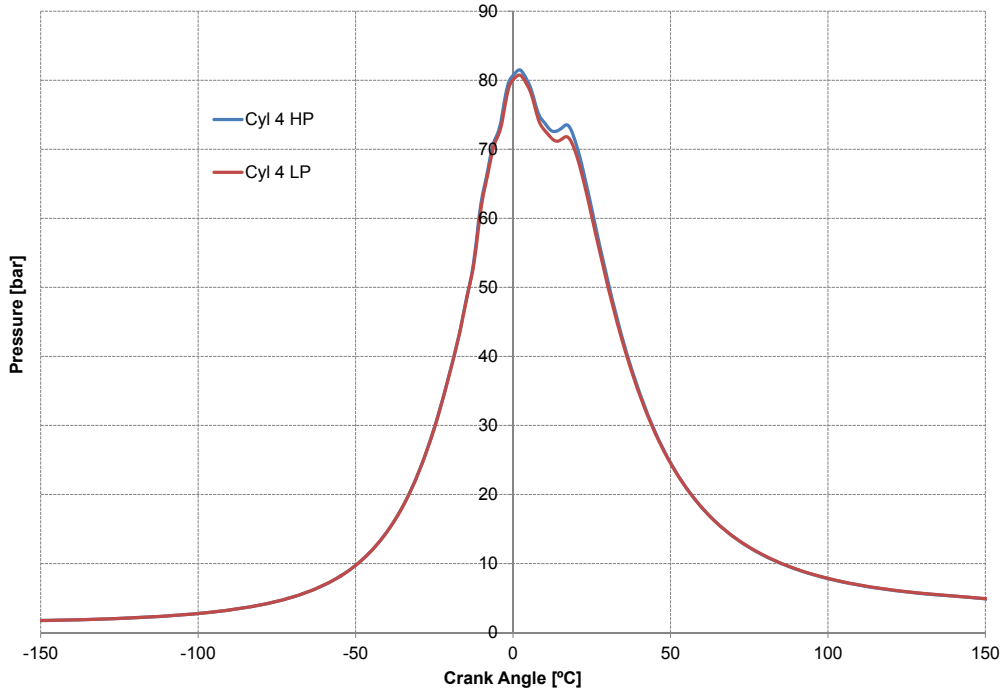


Figura 66: Presiones de combustión en el cilindro 4

3.3.3. FQL/DFQL:

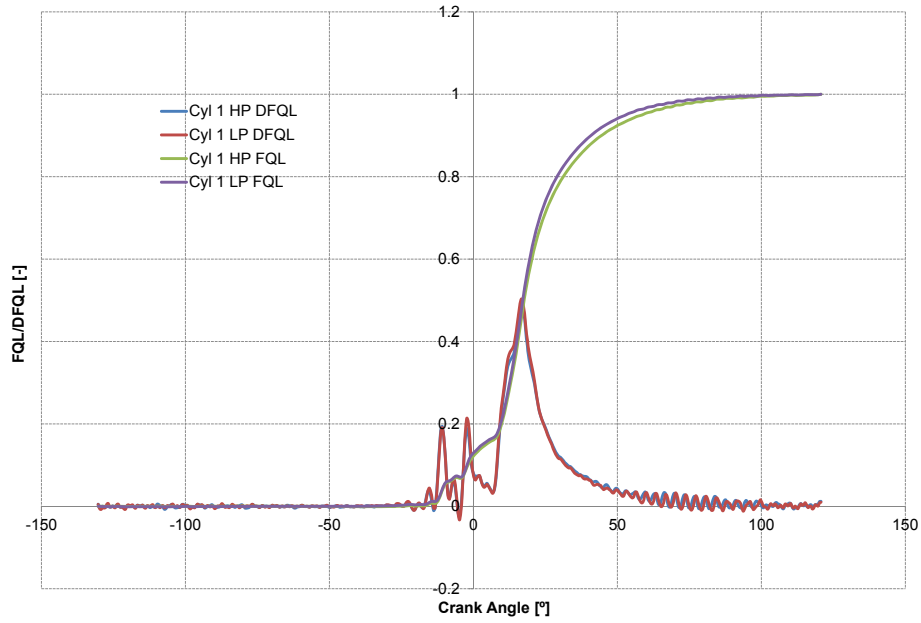


Figura 67: Fracción de calor liberado en el cilindro 1

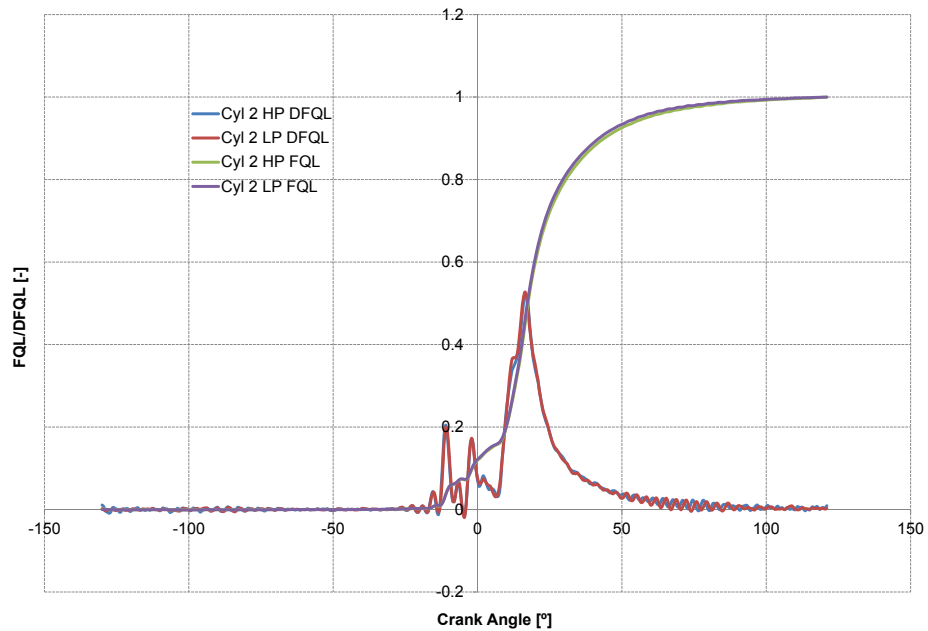


Figura 68: Fracción de calor liberado en el cilindro 2

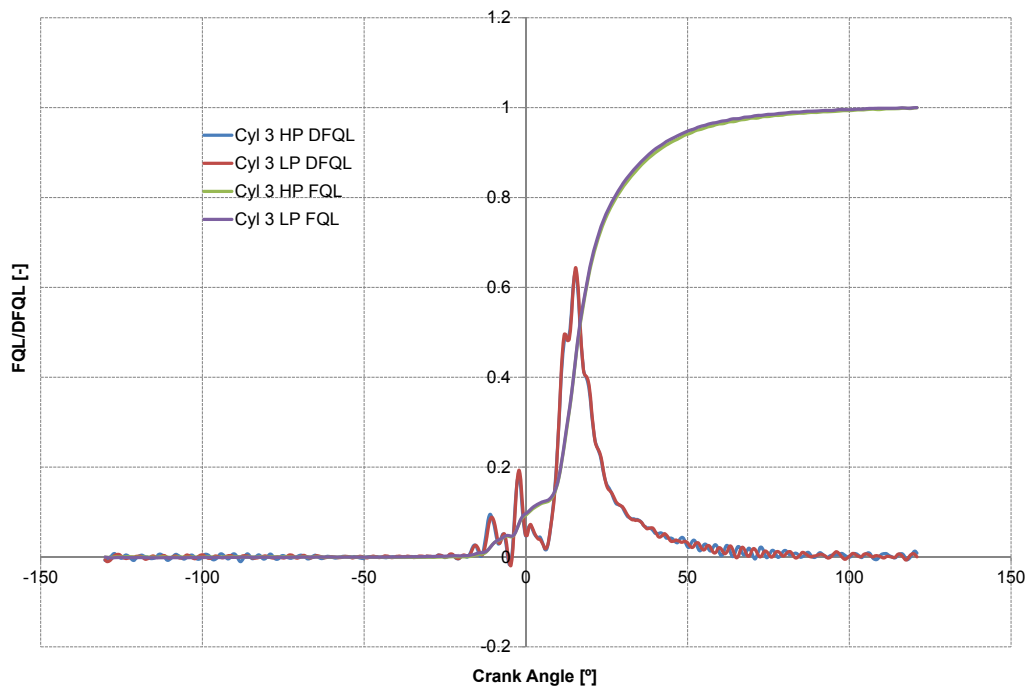


Figura 69: Fracción de calor liberado en el cilindro 3

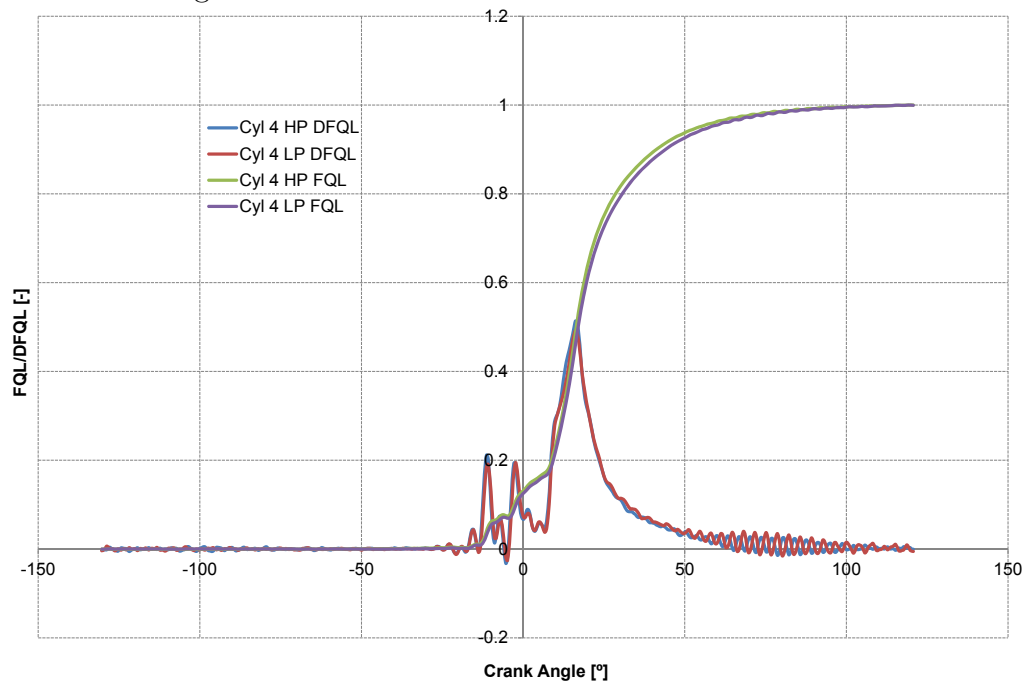


Figura 70: Fracción de calor liberado en el cilindro 4