



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

**TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

# **ESTUDIO ENERGÉTICO DE UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN Y ARQUITECTURA 2-TIEMPOS OPERANDO CON EL CONCEPTO DE COMBUSTIÓN PARCIALMENTE PREMEZCLADA**

AUTOR: ANTONIO ALCÁZAR LÓPEZ

TUTOR: RICARDO NOVELLA ROSA

**Curso Académico: 2015-16**





## **AGRADECIMIENTOS**

He de agradecer a mi madre por hacer uno de sus sueños realidad.

Como buen creyente creo en la suerte, y cuanto más trabajo más parece tener.-Coleman Cox



## Resumen

El grueso de este trabajo final de grado es el estudio de un motor de arquitectura 2 tiempos a compresión con la innovación de que en vez de ser diésel es gasolina. La dificultad radica en el hecho de conseguir una buena combustión en el cilindro sin provocar picados de biela además de producir exceso de contaminantes.

Para ello se ha introducido el nuevo concepto PPC, que consigue hacer detonar la gasolina en unas condiciones óptimas, además también logra un hecho insólito y es la relación lineal entre consumo y contaminantes NO<sub>x</sub>. Hasta ahora esta relación era inversamente proporcional pero con este nuevo concepto se logra reducir ambos a la vez.

Para ello se han realizado un plan de ensayos paramétrico donde al final hemos comparado los resultados iniciales con los finales observando las variaciones de las distintas variables: humos, HC, CO, consumo, NO<sub>x</sub>, rendimiento de combustión.

El estudio forma parte de un proyecto de Renault para fabricar motores ligeros de poca potencia para poder instalarlos en vehículos híbridos.



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

**TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

**Estudio energético de un motor de  
encendido por compresión y  
arquitectura 2-tiempos operando con el  
concepto de combustión parcialmente  
premezclada**

**MEMORIA**

AUTOR: Antonio Alcázar López

TUTOR: Ricardo Novella

**Curso Académico: 2015-16**



# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	5
1.1 Introducción .....	7
1.2. Diferencias MEC y MEP .....	9
1.3 Emisiones contaminantes .....	10
1.4 Fundamentos del motor 2T/VVT .....	10
1.5 Objeto del proyecto .....	13
1.6 Antecedentes y futuros proyectos .....	14
2. HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES Y METODOLOGÍA .....	16
2.1 Introducción .....	18
2.2 Descripción de la sala de ensayos .....	18
2.3 Motor monocilíndrico de investigación .....	19
2.3.1 Motor térmico .....	20
2.3.2 Sistema de inyección .....	21
2.3.3 Sistema de accionamiento de Válvulas (VVT) .....	22
2.4 Sistemas auxiliares .....	23
2.4.1 Sistemas de regulación de par y régimen .....	23
2.4.2 Sistema de admisión .....	23
2.4.3 Sistema de escape .....	24
2.4.4 Sistema de recirculación de gases de escape (EGR) .....	24
2.4.5 Sistema de refrigeración y lubricación .....	25
2.4.6 Sistema de alimentación y acondicionamiento de combustible .....	25
2.5 Instrumentación y equipos de medida .....	26
2.5.1 Medida de par (torquímetro) .....	26
2.5.2 Medida de régimen de giro (freno dinamométrico) .....	26
2.5.3 Transductores de presión y temperatura media .....	26
2.5.4 Sensores de variables instantáneas .....	27
2.5.5 Medida del gasto másico de aire .....	27

2.5.6 Medida de gasto másico de combustible.....	28
2.5.7 Acondicionador de combustible.....	28
2.5.8 Medida de Blow-by.....	28
2.5.9 Medida de las condiciones ambientales.....	29
2.5.10 Medida de emisiones contaminantes.....	29
2.5.11 Medida de posición del ángulo del cigüeñal.....	29
2.5.12 Sistemas de control y adquisición de variables medias.....	30
2.6 Metodología de ensayo.....	30
2.6.1 Definición de las condiciones de ensayo.....	30
2.6.2 Rutina para los ensayos de optimización.....	31
2.7 Calmec.....	33
2.8 Conclusiones.....	34
3. DEFINICIÓN DEL PLAN DE ENSAYO.....	36
3.1 Introducción.....	38
3.2 Estudio del concepto PPC con gasolina.....	39
3.2.1 Descripción del problema y objetivos.....	39
3.2.2 Variables de respuesta y factores experimentales.....	39
3.3 Metodología de implementación de la estrategia PPC.....	42
3.3.1 Introducción.....	42
3.3.2 Matrices de ensayo.....	43
3.4 Conclusión.....	45
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	47
4.1 Introducción.....	49
4.2 Selección de óptimos.....	50
4.3 Comparación puntos iniciales y óptimos.....	54
4.4 Análisis de los resultados.....	58
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	65
5.1 Introducción.....	67
5.2 Conclusiones.....	67
5.3 Trabajos futuros.....	69
6. BIBLIOGRAFÍA.....	71
7. COSTES.....	80



# **CAPÍTULO 1**

## **Introducción**

**Contenido:**

### **1. INTRODUCCIÓN**

#### **1.1 Introducción**

#### **1.2 Fundamentos del motor 2T/VVT**

#### **1.3 Objeto del proyecto**

#### **1.4 Antecedentes**

#### **1.5 Viabilidad**



## 1.1 Introducción.

Un motor se puede considerar como un dispositivo que permite transformar cualquier tipo de energía en energía mecánica. Dentro de este amplio campo, se encuentra motor térmico, que se puede definir como el dispositivo que permite obtener energía mecánica a partir de energía térmica contenida en un fluido compresible. Se necesitara además disponer de un fluido de trabajo que sea capaz de variar su energía a partir de la energía térmica y de los elementos mecánicos adecuados para que el fluido pueda transformar su energía en energía mecánica. En el caso del que el fluido desarrolle un trabajo sobre una superficie móvil, esta puede desplazarse mediante un movimiento rectilíneo. En este caso se tendría un motor alternativo, y generalmente el proceso de combustión tendrá lugar en el propio fluido de trabajo, siendo este generalmente una mezcla de aire-combustible. Dando lugar al conocido motor de combustión interna alternativo (MCIA), el cual será objeto de este proyecto.

Los motores de combustión interna alternativos actuales tienen ya más de un siglo de historia. Si hubiera que escoger una fecha que marcara el nacimiento de los motores modernos, sería en el año 1867, cuando el alemán Nicolaus Otto solicitó la patente titulada Gasmotor, obtenida a nombre de las Gasmotorenfabrik Deutz AG con el número DE 532.

Los primeros antecedentes de los MCIA son las máquinas de vapor, desarrolladas en el siglo XVIII, durante la primera revolución industrial. Los MCIA tienen en común que consiste en ser máquinas volumétricas.

El primero en establecer la importancia de comprimir la carga del cilindro antes de la combustión fue el francés Eugène Beau Rochas.

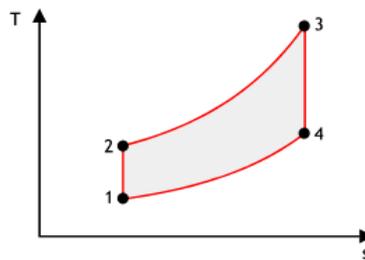


Figura 1 Diagrama T-s Rochas.

El primer motor de 4 T fue diseñado por Nikolaus Otto, el cual se basó en los estudios de Rochas. Posteriormente, Gottlieb Daimler y Wilhelm Maybach, colaboradores de Nikolaus Otto y cuyas divergencias habían provocado su separación, patentaron un nuevo tipo de motor de gas, el cual se encendía por compresión. Pero fue Rudolf Diesel quien, con el objetivo de aproximarse lo máximo posible al ciclo de Carnot, desarrolló el ciclo de referencia asignado a los motores de encendido por compresión (MEC). La diferencia fundamental entre el ciclo Otto y el ciclo Diésel está en la fase de aportación del calor. En el ciclo Otto el calor era introducido a volumen constante, mientras que en el Diésel es a presión constante.

Atendiendo al proceso de combustión de los MCIA, se clasifican en motores de encendido provocado (MEP) o motores de encendido por compresión (MEC).

Y según el ciclo de trabajo, se pueden clasificar en motores de cuatro tiempos (4T) y de dos tiempos (2T). La diferencia entre estos dos tipos de motores tiene que ver básicamente con el proceso de renovación de la carga, es decir, escape y admisión.

El motor de cuatro tiempos se caracteriza por completar el ciclo en cuatro carreras del émbolo.

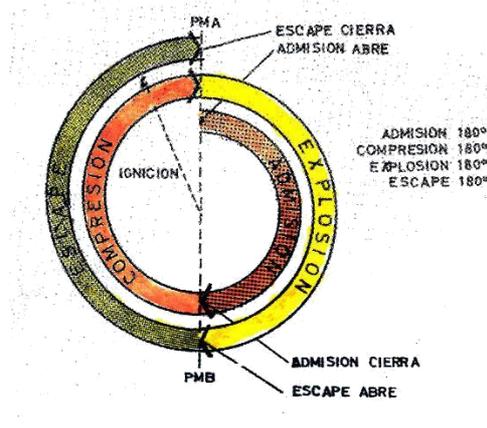


Figura 2: Ciclos motor 4T.

1. Aspiración de los gases dentro del cilindro:

(Movimiento descendente del émbolo de  $0^{\circ} \rightarrow 180^{\circ}$  de ángulo de cigüeñal)

2. Compresión

(Movimiento ascendente del émbolo  $180^{\circ} \rightarrow 360^{\circ}$  de ángulo de cigüeñal.)

3. Combustión y su efecto

(Movimiento descendente del émbolo  $360^{\circ} \rightarrow 540^{\circ}$  de ángulo de cigüeñal)

4. Evacuación de los gases fuera del cilindro

(Movimiento ascendente del émbolo  $540^{\circ} \rightarrow 720^{\circ}$  de ángulo de cigüeñal)

La principal característica del motor de 2T es que se completa el ciclo solamente en 2 carreras de embolo, con una vuelta del cigüeñal. Es el mismo proceso que en el motor de 4 T pero reduciendo la duración angular.

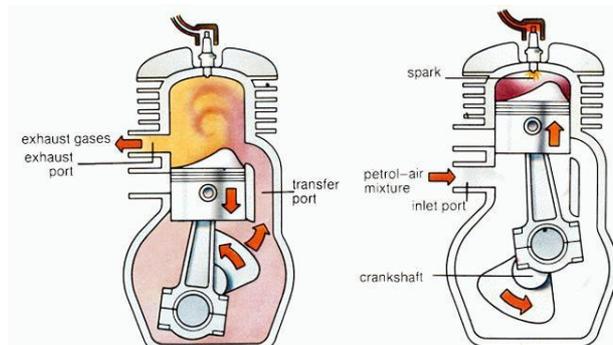


Figura 3: Ciclo motor 2T.

Esto se consigue realizando en la carrera ascendente del pistón simultáneamente los procesos de admisión y compresión por un lado, y los de combustión-expansión y escape durante la carrera descendente por el otro. En realidad la distinción entre procesos de escape y admisión no es tan clara si no que ambos pueden coexistir cuando el pistón se encuentra en las proximidades del PMI.

## 1.2 Diferencias MEC y MEP

La clasificación más importante de todas es la que separa los motores MEP y MEC ya que es preciso utilizar diseños constructivos específicos.

La característica fundamental es el proceso de encendido de la mezcla aire combustible, y la subsecuente evolución de la combustión.

Por un lado el autoencendido de la mezcla en los MEC obliga a conseguir una temperatura elevada en la cámara de combustión, y evitar que el combustible este mucho tiempo en contacto con el aire, para evitar que el encendido espontaneo sin control, por lo que el proceso de mezcla debe realizarse hacia el final de la carrera de compresión inyectando el propio combustible en la cámara de combustión. Este hecho exige duras exigencias al sistema de inyección. Por otro lado, este sistema permite controlar la carga simplemente variando la cantidad de combustible inyectado, sin modificar la cantidad de aire admitido. Asimismo, el combustible debe cumplir unos requisitos específicos impuestos por el sistema de inyección y por la necesidad de autoencenderse con facilidad.

En el caso de los MEP, el encendido se provoca por aporte de energía del exterior en un punto de la cámara de combustión, desde donde se inicia la propagación de un frente de llama. Para ello es necesario conseguir una mezcla homogénea en todo el volumen de la cámara de combustión, y que se encuentre dentro de los límites de combustión. Ello obliga a realizar el proceso de mezcla muy pronto en el ciclo, generalmente durante al carrera de admisión, y a impedir que el combustible se autoencienda durante la carrera de compresión, limitando la temperatura de la mezcla en el cilindro. La exigencia de una mezcla aire-combustible homogénea en los límites de inflamabilidad obliga a que la regulación de la carga se haga controlando tanto la masa de combustible aportado, como la masa de aire comprimido, obligando normalmente a estrangular el flujo en el conducto de admisión.

Estos hechos motivan la existencia de diferencias importantes entre los MEP y los MEC respecto al modo de formar la mezcla aire-combustible, a como se regula la carga, al tipo de cámaras de combustión, al tipo de combustible empleado y finalmente a los valores de potencia específica y rendimientos que pueden conseguir.

### 1.3. Emisiones contaminantes en motores Diesel y Gasolina.

Las emisiones producidas por los motores es uno de los factores más importantes a la hora de diseñar un MCIA. Los factores de potencia y consumo han quedado en segundo plano, ya que, si no cumplen con la normativa de contaminación no es posible comercializarlo.

Aunque pueda parecer que los MCIA son muy contaminantes, la realidad es que aproximadamente solo el 1% de sus gases pueden considerarse contaminantes. El problema no es que sean contaminantes si no, la gran cantidad que hay en funcionamiento cada día. Los contaminantes principales son los hidrocarburos sin quemar (HC), el monóxido de carbono (CO), las emisiones de partículas (PM) y los óxidos de nitrógeno (NOx).

Estos parámetros serán fundamentales a lo largo del proyecto de investigación, de ellos dependerán las tomas de decisión y serán determinantes para obtener conclusiones.

Las emisiones de hidrocarburos HC pueden tener importantes efectos sobre la salud humana. Estas emisiones suelen ser superiores en los motores de gasolina. Debido a que hay más combustible cerca de las paredes, el cual es expulsado al exterior en la carrera de escape, y cerca de las válvulas de escape, el cual durante el cruce de válvulas es expulsado.

El monóxido de carbono CO es un contaminante fuertemente asfixiante, siendo muy peligro en espacios cerrados. El CO es un producto intermedio de la oxidación de un hidrocarburo.

La mayor parte de las emisiones se deben al dosado: en regiones pobres no son capaces de quemarse rápidamente y en las ricas no pueden realizarlo por falta de oxígeno.

Las emisiones de óxidos de nitrógeno NOx son responsables de fenómenos tales como la lluvia ácida o el smog fotoquímico, además de reducir al capa de ozono y ser irritante para los ojos.

La mayor parte de las emisiones se deben a la reacción del oxígeno y el nitrógeno a elevadas temperaturas. Los motores diesel tiene más problemas con este tipo de contaminación ya que deben alcanzar elevadas temperaturas durante la compresión.

Por otro lado el CO<sub>2</sub> como tal no puede considerarse como contaminante, pues son un producto directamente asociado a la combustión de hidrocarburos. Sin embargo, contribuye al efecto invernadero, principal problema mundial.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> son menores en los motores diesel pero, por contrapartida, estos producen más NOx y partículas que son más perjudiciales para la salud.

Por ello en este proyecto se utilizara gasolina 95 como combustible en un motor prototipo de tipo MEC de 2 tiempos. Es un proyecto pionero en el uso de gasolina en un sistema de combustión MEC donde se pretende obtener lo mejor de la gasolina con lo mejor de los sistemas MEC

## 1.4. Fundamentos del motor 2T/VVT

Como ya se ha visto anteriormente el motor de 2T realiza todo el proceso de la combustión en la mitad de ciclos que en el motor de 4T, por lo que su número de ciclos de trabajo es la mitad. Dando lugar a una arquitectura caracterizada por una potencia específica más elevada.

La principal diferencia en el funcionamiento entre estos 2 tipos de motor reside en el control de la apertura y cierre del recinto de combustión para realizar la distribución de los gases. En el motor de 2 T no es necesario un mecanismo, ya que el propio cigüeñal puede realizar dicho trabajo al tener el mismo periodo. Además para la renovación de la carga, que comprende al aspiración de la carga fresca y la expulsión de los gases residuales, se realiza sin necesidad de un mecanismo externo.

En consecuencia, el motor 2T es un motor compacto, sencillo mecánicamente, económico de fabricación, ligero, con un centro de inercia próximo al eje del cigüeñal y fácil de mantener. Por otro lado, las facilidades mecánicas del control de la distribución, dan lugar a una disminución de la eficiencia en la eficiencia de la circulación de gases a través del recinto de combustión, dificultando el comportamiento de la renovación de la carga. Debido a esta problemática, su potencia no es el doble, sino que está aproximadamente entre 1'2 y 1'6 veces la del motor 4T

La renovación de la carga se caracteriza por la existencia de cortocircuito, donde se pretende que la carga fresca ayude a expulsar los residuos del ciclo anterior. Lo que provoca que parte de esta carga fresca se pierda por el escape reduciendo así el rendimiento y aumentando el consumo. Esta carga fresca también provoca problemas de contaminación del medio ambiente.

Como consecuencia, los motores de 2T tienen más complicado superar las normativas anticontaminantes en determinadas condiciones de uso. Por ello que solo se puedan utilizar en vehículos de pequeña cilindrada y prestaciones de maquinaria, donde importa más la economía global del producto.

De ahí que nuestro estudio vaya dirigido a reducir el consumo y los contaminantes en los motores de 2T, ya que estos son mecanismos muy interesantes desde el punto de vista económico pero donde estos 2 inconvenientes los relegan a un segundo plano a día de hoy. Las facilidades de control de los actuales sistemas eléctricos serán decisivas para nosotros

El sistema de distribución es fundamental para el control de la potencia, ya que dependiendo de la cantidad de aire que logremos introducir en el cilindro, mayor será la potencia del motor. Y este va a estar controlado por el árbol de levas, que es el elemento fundamental junto con las válvulas.

Pero se nos presenta el problema que cuanto más rápido gira el motor más complicado resulta realizar el proceso de renovación de carga dentro del cilindro, por lo que dependiendo del régimen del motor se determinara un momento óptimo de apertura y cierre de válvulas .

Las levas determinan diferentes características importantes de la distribución. Si la leva tiene un valor angular elevado, la apertura de la válvula durará más tiempo; si la altura máxima de la leva es grande, las válvulas tendrán una gran carrera de apertura, y si la leva tiene un perfil muy agudo, la apertura y cierre de la válvula serán muy rápidos.

Estos movimientos de apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape se representan en el llamado diagrama de la distribución, en el cual se expresan los ángulos de giro del cigüeñal en los que se producen la apertura y cierre de las válvulas.

Con el diagrama de un motor se puede conocer el carácter de un motor, los motores más rápidos disponen de ángulos más grandes que los que funcionan a regímenes de velocidad moderados.

Conforme aumentan las revoluciones de trabajo, es necesario avanzar o retardar los puntos teóricos de apertura y cierre de las válvulas respectivamente, con el fin de admitir la máxima cantidad de aire o carga y reducir el trabajo de escape. Obteniendo unos puntos característicos de trabajo:

- AAA: avance apertura admisión.
- RCA: retraso cierre admisión.
- AAE: avance apertura escape.
- RCE: retraso cierre escape.

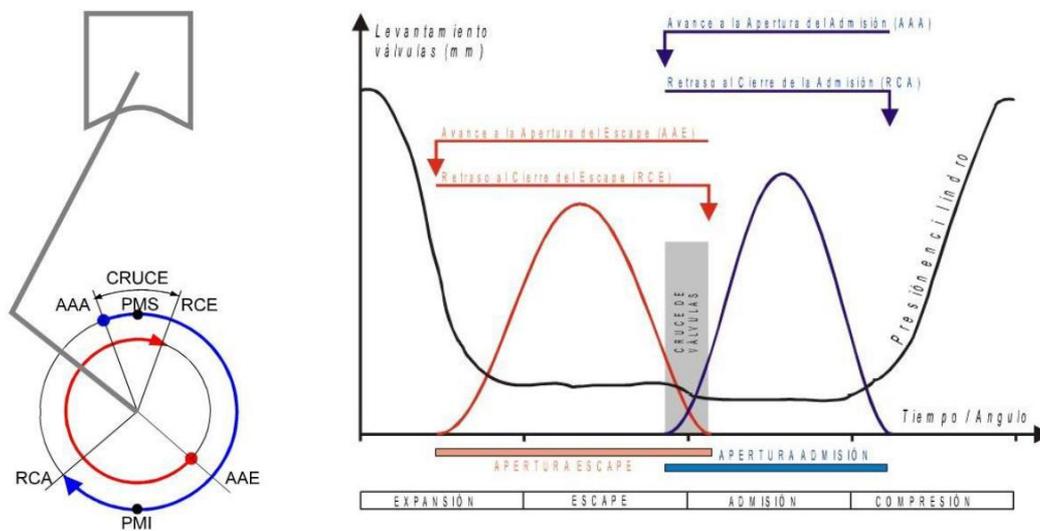


Figura 1.3: Diagrama de distribución y ley de levantamiento de válvulas de un motor 4T.

En la figura 1.3 se observa un diagrama de distribución típico de motor de 4tiempos. El ciclo se desarrolla durante dos vueltas de cigüeñal y cuatro carreras del pistón. Comprobamos que en un motor de 2T, el cruce de válvulas es mucho mayor debido a realizar los mismos procesos en la mitad de vueltas o grados de cigüeñal, tal como se muestra.

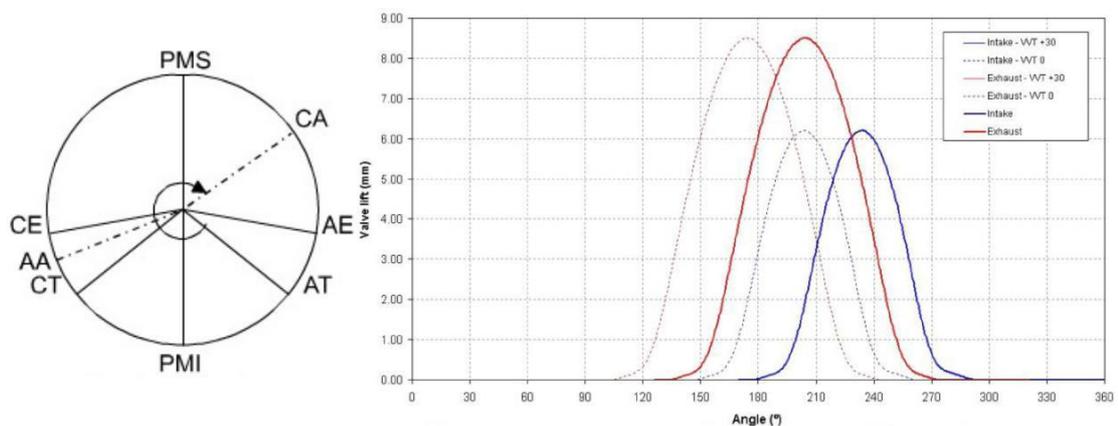


Figura 1.4: Diagrama de distribución y ley de levantamiento de válvulas de un motor 2T

Los sistemas de distribución variable son capaces de cambiar la apertura y cierre de las válvulas en función del régimen, de un preciso momento, del motor.

Principalmente se utilizan 2 tipos: la distribución por lumbrera y la distribución por válvulas. El primero tiene como inconveniente fundamental su pérdida de estanqueidad a bajas revoluciones y su falta de respiración a altas. Aunque los sistemas de distribución por válvulas también padecen problemas, sobre todo en la regulación, existen los sistemas de distribución variable (VVT) que permiten regular el ángulo de apertura de la válvula y la altura de alzamiento. Las siglas VVT o VVA significan “Variable Valve Timing” o “Variable Valve Actuation”. Este tipo de sistema ya se encuentra en los vehículos actuales.

Los VVT actúan sobre los levantamientos de válvulas, decalado del árbol de levas y el tiempo de apertura de las válvulas. Al decalar el árbol de levas del cigüeñal se gira desplazando el adelantado la apertura o retrasando el cierre, pero ambos parámetros a la vez, ya que están directamente relacionados.

## 1.5 Objeto del proyecto.

Dicho proyecto se encuentra dentro de un proyecto de colaboración “Powertrain of future light-duty vehicles (POWERFUL)” cuyo fin es la investigación y desarrollo de futuros motores de vehículos ligeros para transporte terrestre. Está compuesto por los siguientes sub-proyectos:

- V1. Motor de 4T MEP caracterizado por bajas emisiones y bajo coste.
- V2. Motor de 4TMEC con combustible a medida e integrando el modo LTC (Low Temperature Combustion) al sistema de encendido por compresión.
- V3. Concepto de motor 2T funcionando con combustible diésel e integrando el modo LTHC (Low Termal Homogeneous Combustion) al sistema de encendido por compresión. El presente trabajo se enmarca en este sub-proyecto.

El sub-proyecto V3 se parte de la base de los resultados obtenidos por el proyecto NICE de la Unión Europea; cuyo fin era el desarrollo de una combustión pura en modo HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) cumpliendo los límites de la norma Euro6 sin necesidad de caros sistemas de post-tratamiento. Por contra, el consumo de combustible sufrió un aumento de entre el 2% y el 5%, además de un rango de par y potencia reducido. El modo HCCI era aceptable para un rango de 3 a 8 bares de presión efectiva media indicada (IMEP); por debajo de 3 bares de IMEP, las inestabilidades en la combustión obligaban a utilizar el modo LTC. Otro aspecto era poder obtener un tipo de combustión mixto buscando una reducción de los óxidos de nitrógeno (NOx), obteniendo el nuevo concepto LTHC, combustión homogénea con baja carga térmica. Las bajas temperaturas se consiguen a través de la recirculación interna de gases (IGR), que a su vez dan lugar a una reducción significativa de emisiones de hidrocarburos sin quemar (HC) y monóxido de carbono (CO), uno de los mayores inconvenientes del modo HCCI puro.

Para administrar la eficiencia de la relación de IGR en el cilindro, se diseñó y utilizó un sistema de sincronización variable de válvulas (VVT). Por encima de 8 bares de IMEP, el proceso LTHC no se puede mantener sin un inaceptable ruido de combustión. Variar el modo de operación del motor de 4T a 2T es la única manera de superar la menor densidad de energía del proceso LTHC y la limitación del ruido de combustión, pero un enfoque tan innovador requiere el desarrollo de un nuevo y completo concepto de motor.

El objetivo del sub-proyecto V3 “Aplicación 2T diésel para vehículos pequeños” es el desarrollo de un motor de tres cilindros y arquitectura 2T de encendido por compresión capaz de superar la baja densidad de potencia y la limitación del ruido de combustión del modo HCCI en el motor 4T utilizado en el proyecto NICE. En resumen, la justificación del uso de estas soluciones es el siguiente:

- Arquitectura 2T para superar las limitaciones del modo HCCI en un rango del motor definido.
- Modo LTHC para reducir partículas en suspensión (PM) y  $\text{NO}_x$  sin la necesidad de un catalizador de  $\text{NO}_x$  y utilizando únicamente un ligero filtro de partículas para PM.
- Downsizing para reducir las emisiones de  $\text{CO}_2$ .
- Sistemas de control del aire VVT para administrar el balance entre gases frescos y residuales.
- Estrategia avanzada de impulsión combinando un compresor volumétrico con un turbogrupo para limitar las emisiones de  $\text{CO}_2$ .

El estudio y ensayo del proyecto se lleva a cabo en un motor monocilíndrico experimental derivado del Renault K9K con las características citadas anteriormente para el motor tricilíndrico.

Tras la finalización de las dos primeras fases, en la que la primera se centra en la evaluación del modo de funcionamiento descrito anteriormente para el sub-proyecto V3 (HCCI + LTHC) y la segunda en la búsqueda de la disminución de consumo manteniendo unos niveles de emisiones contaminantes aceptable, este documento se basa en la combustión de premezcla parcial (PPC) de los combustibles. El rango de octanaje de la gasolina ha demostrado su potencial para lograr la reducción de emisiones simultánea de hollín y  $\text{NO}_x$ , combinado con altos indicadores de eficiencia; mientras todavía conserva el control total de la fase de combustión combinada con la inyección, contrariamente a las estrategias de premezcla total.

Sin embargo, los combustibles de gasolina de alto octanaje proporcionan un encendido fiable a baja carga, mientras que las mezclas de combustibles con bajo octanaje presentan problemas de retraso de encendido a alta carga produciendo Knocking en la combustión. Por lo tanto, elegir un combustible apropiado y una estrategia de inyección adecuada es fundamental para resolver estas cuestiones, asegurando el éxito de la estrategia PPC en todo el mapa del motor.

En este marco, el objetivo de la presente investigación consiste en evaluar el uso de múltiples estrategias de inyección para lograr el funcionamiento estable de la estrategia PPC, alcanzando bajas emisiones de  $\text{NO}_x$  y hollín junto con altas eficiencias.

## 1.6 Antecedentes y futuros proyectos.

El CMT de la Universidad Politécnica de Valencia, es puntera en investigación. Las principales innovaciones son: combustión, renovación de la carga, técnicas experimentales de visualización, mantenimiento y ruido.

Gracias su labor recibe importantes convenios de empresas externas para la investigación de mejoras en la industria de la automoción.

El proyecto actual pertenece a la 3 fase del proyecto V3 Poweful en colaboración con la empresa Renault, con ayudas de la Unión Europea.

Es necesario cumplir una serie de requisitos, tales como disponer de los medios necesarios para realizar un proyecto de estas magnitudes y precisión, personal cualificado y un fondo económico que pueda respaldarnos.

Para poder subvencionar la mayoría de proyectos se requiere de la colaboración de empresas del sector del automovilismo donde se pueda realizar una relación de simbiosis.

La colaboración y experiencia del personal docente, técnicos, doctorandos, y proyectandos del laboratorio hacen factible el desarrollo de este tipo de proyecto.



# CAPÍTULO 2

## Herramientas experimentales y metodología

**Contenido:**

### **2. HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES Y METODOLOGÍA**

#### **2.1 Introducción**

#### **2.2 Descripción de la sala de ensayos**

2.2.1 Bancada

2.2.2 Sistema de ventilación

2.2.3 Red de agua de refrigeración

2.2.4 Red de combustible

2.2.5 Instalación de aire comprimido

2.2.6 Sistema de seguridad

#### **2.3 Motormonocilíndrico de investigación**

2.3.1 Motor térmico

2.3.2 Sistema de inyección

2.3.3 Sistema de acondicionamiento de válvulas (VVT)

#### **2.4 Sistemas auxiliares**

2.4.1 Sistemas de regulación de par y régimen

2.4.2 Sistema de admisión

2.4.3 Sistema de escape

2.4.4 Sistema de recirculación de gases de escape (EGR)

2.4.5 Sistema de refrigeración y lubricación

2.4.6 Sistema de alimentación y acondicionamiento de combustible

## **2.5 Instrumentación y equipos de medida**

- 2.5.1 Medida de par (torquímetro)
- 2.5.2 Medida de régimen de giro (freno dinamométrico)
- 2.5.3 Transductores de presión y temperatura media
- 2.5.4 Sensores de variables instantáneas
- 2.5.5 Medidas de gasto másico de aire
- 2.5.6 Medida de gasto másico de combustible
- 2.5.7 Acondicionador de combustible
- 2.5.8 Medida de Blow-by
- 2.5.9 Medida de las condiciones ambientales
- 2.5.10 Medida de emisiones contaminantes
- 2.5.11 Medida de posición del ángulo del cigüeñal
- 2.5.12 Sistemas de control y adquisición de datos

## **2.6 Metodología de ensayo**

- 2.6.1 Definición de las condiciones de ensayo
- 2.6.2 Rutina para los ensayos de optimización

## 2.1 Introducción.

En todo proyecto de investigación se necesita una selección, puesta a punto, mantenimiento y herramientas experimentales para poder progresar adecuadamente. A continuación, describiremos la sala de ensayos, las herramientas y los instrumentos de medida utilizados durante dicho proceso

## 2.2 Descripción de la sala de ensayos.

La sala de ensayos donde se haya el motor y la instrumentación objeto del presente proyecto, se encuentra en el ya citado anteriormente Departamento de Máquinas y Motores Térmicos (DMMT), en la zona de laboratorios para ensayos de motores.

En dicho laboratorio se encuentran 8 salas de experimentación con todos los aparatos de medida y control necesarios, y cuyo recinto está diseñado con las respectivas medidas de seguridad, insonorización, resistencia estructural y resistencia al fuego.

El motor se encuentra sobre una bancada, cuya función principal de esta es eliminar en al medida de lo posible todo tipo de vibraciones y resonancias producidas por el motor, evitando que estas sean transmitidas al resto de la instalación. Es por ello que un buen diseño de esta es fundamental para el correcto funcionamiento y toma de medidas-

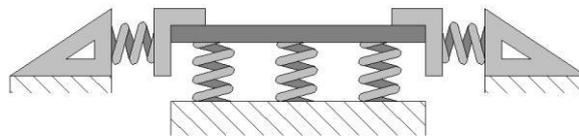


Figura4 : Sistema de resortes de la bancada

Para una correcta toma de medidas también es necesario un sistema de ventilación cuya función es crear una atmosfera idónea para la realización del ensayo dependiendo del punto de ensayo se ajustara a unos parámetros determinados. Así se evitara posibles accidentes debidos a presiones, temperaturas o humedad inadecuadas. Además de poder asegurar una correcta refrigeración de algunos elementos de la sala.

El sistema general de agua del edificio es el encargado de suministrar agua para la refrigeración de cualquier equipo que lo necesite. Está formada por un aljibe de 50 metros cubicos enterrado en el exterior del edificio, al cual retornan las aguas después de realizar la refrigeración de los equipos. Para mantener una temperatura óptima de trabajo dicha agua se refrigera antes de retornar en una torre situada en la azotea. Temperatura que puede ser controlada desde el laboratorio.

La instalación de aire comprimido auxiliar está formada por un compresor, en las salas se dispone de unos reguladores de presión. Todo el sistema está abastecido por un conjunto de compresor-secador-remanso, situado en una sala para tal fin.

Y en lo referente a seguridad en la sala existen sistemas de seguridad de incendios, presencia de CO y de Metano en la atmósfera.

## 2.3 Motor monocilíndrico de investigación.

El motor térmico de este proyecto es un motor de encendido por compresión (MEC) de 2 tiempos, con la posibilidad de utilizar biocombustible, dotado de inyección directa, sistema de distribución variable (VVT) y sobrealimentación, creado para la investigación del proceso de combustión. Realizaremos ensayos con distintas geometrías de émbolos (pistón) y de distinto material de fabricación (acero y aluminio), inyección múltiple para reducir contaminantes y recirculación de gases de escape. Con ello se pretende obtener mejoras en el rendimiento térmico del motor.



Figura 5: Vista del motor térmico de investigación situado en la sala de ensayo.

### 2.3.1 Motor térmico.

El motor consiste en una unidad cuyo diseño está basado en el modelo K9K de Renault, con árboles contrarrotantes y un bloque de motor desmontable de camisa húmeda con una cilindrada de 364 cm<sup>3</sup>, fabricado por la empresa Danielson Engineering. El motor no acciona ningún equipo auxiliar

#### Características del motor:

- Unidad básica Danielson con masa contrarrotantes para la mejora del equilibrado.
- 2 Tiempos.
- Refrigeración líquida.
- Culata multiválvulas (4 válvulas por cilindro).
- Volumen barrido por el pistón: 364 cm<sup>3</sup>.
- Diámetro x Carrera: 76 x 80'5 mm.
- Régimen de giro máximo: 5000 rpm.
- Relación de compresión: 1:17'8 / 1:14'5.
- Sentido de giro: horario (situado frente a la distribución).
- Peso aproximado del motor: 80 kg.

#### Cárter.

El cárter es de tipo seco y obtiene buenos resultados ya que su depósito se encuentra situado en un sistema independiente del motor.

#### Bloque motor.

Es la parte encargada de unir la bancada con la culata, cuya finalidad es la soportar el cigüeñal y sus esfuerzos.

El encargado de lubricar y refrigerar la falda y la cabeza del pistón es un sistema de aceite.

#### Cigüeñal.

El cigüeñal es el encargado de transformar el movimiento alternativo del pistón en un movimiento rotativo. Además transmite el giro y la fuerza motriz a los órganos de transmisión acoplados al mismo.

#### Biela

Es el elemento que transforma el movimiento lineal del pistón en uno rotacional acorde con el cigüeñal.

#### Pistón

La geometría esta diseñada para retener más el gas en el proceso de barrido, debido al hecho de ser un motor de dos tiempos, el gas que entra en el cilindro tiende a salir por inercia.



**Figura 6: Imagen característica de la geometría del pistón**

#### Árboles contrarrotantes.

Son los encargados de compensar las vibraciones provocadas por las explosiones alternativas.

#### Volante de inercia.

Cuya función es la de regular el giro del motor aprovechando su gran masas. Utiliza la energía cinética de la carrera motriz para cederla durante el tiempo pasivo.

#### Culata

La culata ha sido realizada en aluminio, es multiválvulas (4 válvulas) y con doble árbol de levas.

### **2.3.2 Sistema de inyección.**

El sistema de inyección utilizado es de tipo Common Rail, o conducto común, de la firma Delphi (modelo DFI 1.5 1800 bar de presión máxima), y cuenta con un acondicionador de combustible que permite controlar en todo momento la presión y temperatura del combustible a inyectar, consiguiendo así una mayor repetitividad en las posteriores medidas y ensayos. Al tratarse de un motor para la investigación está diseñado específicamente para poder modificar sus parámetros de una manera fácil y sencilla

### 2.3.3 Sistema de accionamiento de Válvulas (VVT).

El sistema de distribución de válvulas montado (VVT) formado por un sistema hidráulico que consiste en una carcasa que es impulsada por la correa de distribución y la paleta que está fijada al árbol de levas. Entre la carcasa y la paleta se aloja el aceite provocando un desfase en el árbol de levas, según sea la dirección, para adelantar o retrasar el tiempo de apertura de las válvulas de admisión y escape.

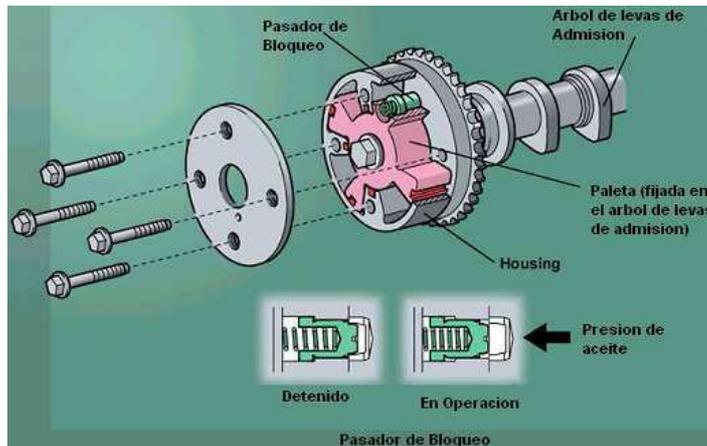


Figura 7. Detalle del pasador de bloqueo del sistema VVT.

#### Avance y retraso.

La válvula OCV se mueve permitiendo que las cámaras se llenen de aceite y la paleta se mueva a la derecha o izquierda, transmitiendo el movimiento de avance o retroceso al árbol de levas.

Cuando la válvula OCV está colocada por medio de la señal de avance recibida por la ECU, la presión de aceite resultante se aplica en la cámara de paletas para hacer girar el árbol de levas en la dirección del avance.

La válvula OCV se mueve permitiendo que las cámaras se llenen de aceite y la paleta se mueva a la derecha o izquierda, transmitiendo el movimiento de avance o retroceso al árbol de levas.

Cuando la válvula OCV está colocada como se muestra en la siguiente figura por medio de la señal de avance recibida por la ECU, la presión de aceite resultante se aplica en la cámara de paletas para hacer girar el árbol de levas en la dirección del avance.

La gestión se realiza gracias a una ECU dedicada en exclusiva para este sistema y a través de un paquete informático elaborado y facilitado por Renault.

## 2.4 Sistemas auxiliares.

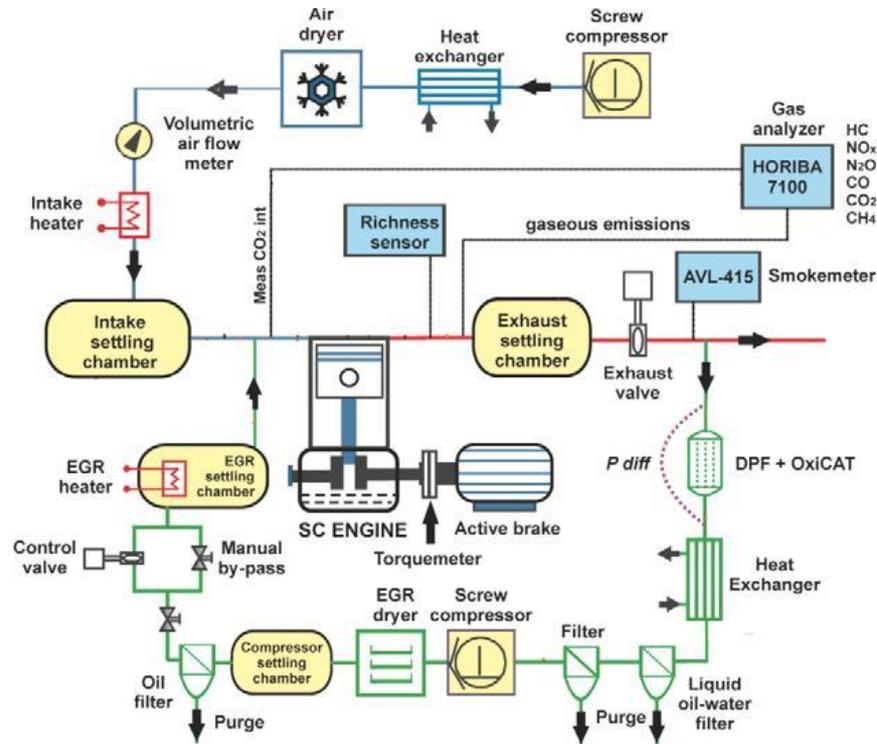


Figura 8: Esquema de la instalación del motor experimental junto con sus sistemas auxiliares.

### 2.4.1 Sistemas de regulación de par y régimen.

Este sistema nos permite controlar el régimen y par del motor estabilizando así un punto de funcionamiento deseado para poder realizar el estudio.

El elemento principal es el freno dinámico, cuya función es disipar la potencia del motor en calor y electricidad.

La medida de par obtenida del dinamómetro se realiza con la ayuda de un torquímetro.

### 2.4.2 Sistema de admisión.

El objetivo de este sistema es reproducir de una forma lo más fielmente posible las condiciones de sobrealimentación que se producen en el motor policilíndrico equivalente. Para ello se dispone de un compresor externo de tornillo rotativo exento de aceite y refrigerado por agua, de la firma sueca Atlas Copco (modelo ZA-1).

Regulando el régimen del motor eléctrico se puede regular la presión que entrega el compresor. Gracias a un variador de frecuencia, una válvula de regulación y un regulador PID.

La temperatura también se regula mediante un PID, que actúa sobre una resistencia de calentamiento de 2 KW situada en la conducción del aire de admisión.

### 2.4.3 Sistema de escape.

La misión de este sistema es la de evacuar los gases de escape que salen del cilindro y simular la contrapresión que genera la turbina del turbocompresor en el motor policilíndrico equivalente. Para ello se dispone de una válvula neumática de guillotina sobre la que actúa un regulador PID.

Además también dispone de un remanso para evitar los efectos indeseados de las ondas de presión.

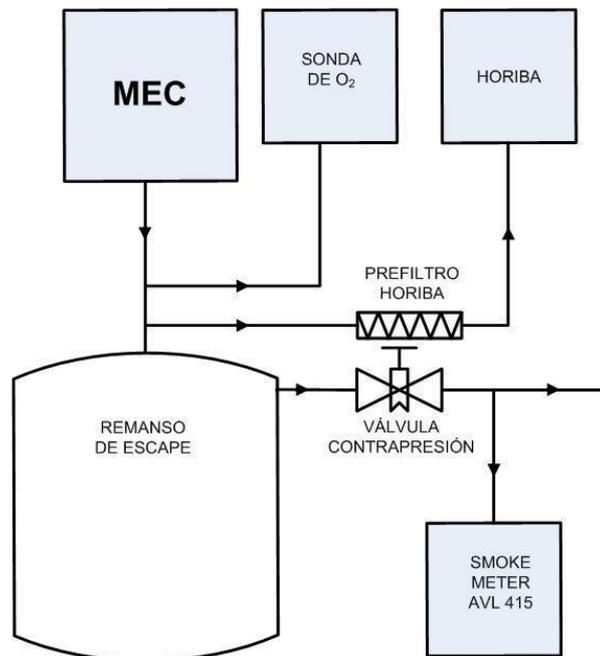


Figura 9: Esquema de componentes del sistema de escape.

### 2.4.4 Sistema de recirculación de gases de escape (EGR).

El sistema EGR es el encargado de reducir los contaminantes, sistema muy común en todos los motores diesel. Su función principal consiste en introducir en el cilindro, durante el proceso de admisión, parte de los gases de escape de la combustión anterior.

Este proceso reduce la temperatura de la combustión lo que resulta en una reducción de NO<sub>x</sub>, ya que, al remplazar gases de escape por gases de la admisión se reduce la cantidad de aire que participa en la combustión.

Los principales elementos que componen el sistema son: Fap o trampa de partículas, un intercambiador de calor aire/agua, compresor, válvula de recirculación y un remanso.

### 2.4.5 Sistema de refrigeración y lubricación.

El sistema de refrigeración es independiente del motor debido a que las pérdidas mecánicas causadas para un solo cilindro son inviables. La sala de ensayos proporciona un circuito de refrigeración y otro de lubricación accionados mediante bombas eléctricas.

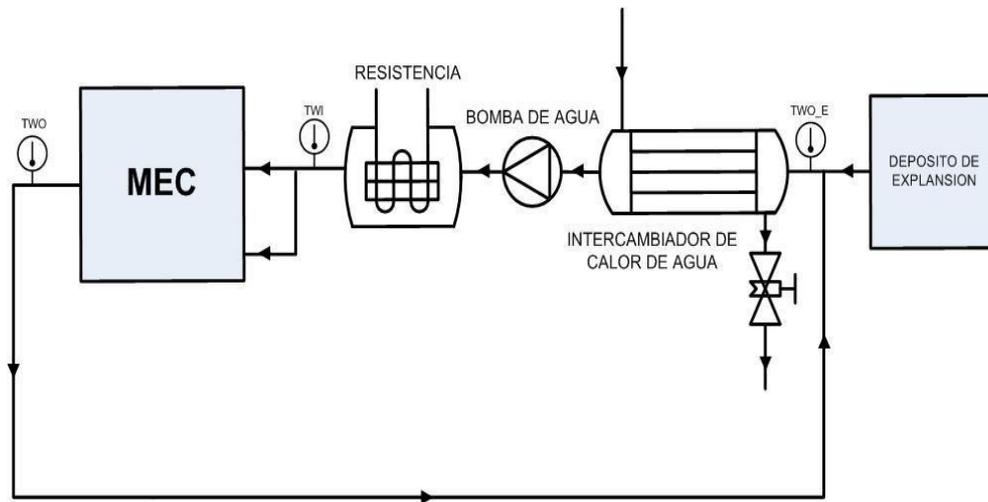


Figura 10: Esquema del sistema de refrigeración

### 2.4.6 Sistema de alimentación y acondicionamiento de combustible.

El motor requiere de unas condiciones de presión y temperatura concreta para el funcionamiento óptimo.

Por lo que se dispone de un acondicionador de combustible que regula la presión y temperatura. Una variación afectaría al comportamiento de la mezcla durante el proceso de inyección-combustión debido a la densidad

## 2.5 Instrumentación y equipos de medida.

### 2.5.1 Medida de par (torquímetro).

Esta medida se realiza con un torquímetro de la marca alemana GIF consistente en un cuerpo de una sola pieza con un sistema sin cojinetes. La torsión de la sección de medida es registrada mediante galgas, convirtiéndose en una señal de voltaje eléctrico y transmitida sin contacto por medio de una luz infrarroja modulada hasta el estator.

El límite de medida de este elemento es de 500 Nm, y un régimen máximo de 7000 rpm.

### 2.5.2 Medida de régimen de giro (freno dinamométrico).

El equipo encargado de medir el régimen es un sensor electromagnético situado en el freno. El dinamómetro utilizado es un freno de corriente alternativa AFA refrigerado mediante circulación de agua forzada:

### 2.5.2 Transductores de presión y temperatura media.

Los transductores son los encargados de medir la presión media, son de tipo piezoeléctricos y con un rango de medida de 0 a 10 bares.

Para la medida de las temperaturas medias se ha optado por la instalación de termopares tipo K, sin recubrimiento en el caso de los gases limpios (admisión), y con recubrimiento de protección en el caso de los gases sucios (escape y EGR). El rango de medida de estos termopares es de 0 a 1100° C, con una precisión de  $\pm 2'5^{\circ}$  C (Figura 2.12).

La temperatura media de los líquidos de los sistemas de lubricación, refrigeración y alimentación de combustible se mide a la entrada y la salida mediante termorresistencias de tipo Pt100, con un rango de medida entre -250 y 850° C, y una precisión de  $\pm 0'3^{\circ}$  C.



Figura 11: Transductor de presión (Izq.) - Termopar encamisado (Der)

#### **2.5.4 Sensores de variables instantáneas.**

Dentro de los sensores utilizados hay que diferenciar los de tipo piezorresistivo y los de tipo piezoeléctrico. Éstos funcionan de la siguiente forma:

##### Piezorresistivo.

El efecto piezorresistivo describe cambios en la resistencia eléctrica de un material, tras aplicar estrés mecánico. En este caso una presión.

A diferencia de los transductores resistivos, los piezorresistivo utilizan semiconductores como cintas extensiométricas en vez de metal y la deformación provoca en este caso una variación de la resistencia específica. La resistencia eléctrica varía proporcionalmente con la resistencia específica.

##### Piezoeléctricos

El principio de los sensores piezoeléctricos se basa en un efecto físico que sucede en unos pocos cristales no conductivos como el cuarzo. Cuando se comprime el cuarzo se produce una polarización eléctrica en superficies opuestas. La deslocalización de la estructura cristalina con carga eléctrica genera un momento dipolar que se refleja en una (aparente) carga de superficies. La intensidad de la carga es proporcional a la fuerza empleada por la presión y la polaridad depende de la dirección. La tensión eléctrica generada por la carga de la superficie puede captarse y amplificarse. El efecto piezoeléctrico es apto únicamente para la medida de presiones dinámicas.

##### Pulso de inyección.

La medida del pulso de inyección se realiza mediante una pinza amperimétrica (Fluke 80i – 110s), que es capaz de medir la diferencia de potencial generada por la circulación de corriente a través del cable de inyección. Esta medida se monitoriza para asegurar que el sistema de inyección funciona correctamente y para conocer el ángulo exacto en el que comienza la inyección.

##### Señales del sistema de válvulas (VVT).

El software de gestión del sistema VVT está conectado a una ECU independiente que controla este sistema. Dicha ECU dispone de las salidas de la señal de admisión y escape, que van conectadas al sistema de adquisición de datos para poder registrarlas.

#### **2.5.5 Medida del gasto másico de aire.**

Para medir el gasto másico (kg/h) de aire se precisa además de un caudalímetro (m<sup>3</sup>/h) de lóbulos rotativos un sensor de presión media y una termorresistencia para poder obtener el valor de la densidad del aire, permitiendo calcular las unidades másicas.

### 2.5.6 Medida de gasto másico de combustible.

Para medir el gasto másico de combustible se ha optado por una balanza gravimétrica modelo AVL 733S. Este sistema basa su funcionamiento en la deformación producida en una galga extensométrica en función de la masa de combustible contenido en una balanza de precisión. El rango de medida de la balanza es de 0 a 160 kg/h con un error de  $\pm 0,2\%$  sobre el valor medido. El almacenamiento máximo de esta balanza es de 1L, aproximadamente 918g (gasolina de 95 octanos) de combustible dependiendo en todo caso de la densidad del combustible a emplear.

### 2.5.7 Acondicionador de combustible.

Para poder acondicionar la temperatura del combustible se ha optado por instalar un acondicionador de combustible de la marca AVL modelo 753C, instalado aguas abajo de la balanza gravimétrica anteriormente mencionada. El acondicionador consta de una resistencia, para poder alcanzar la temperatura deseada y de un intercambiador para poder refrigerar el caudal de combustible, en el caso de querer enfriar en vez de calentar. Dicho intercambiador es regulado por una válvula eléctricamente gestionada. Los conductos de ida al motor y de retorno de combustible están aislados con cartuchos de espuma para disminuir el intercambio de temperatura con el ambiente y así evitar la variación de la temperatura. A continuación mostraré un esquema de cómo está instalado el acondicionador.

### 2.5.8 Medida de Blow-by.

Durante el funcionamiento, la elevada presión existente en la cámara de combustión hace que una parte de los gases producidos se filtre a causa del imperfecto ajuste de los segmentos elásticos de los pistones. En inglés esta filtración se denomina blow-by, que significa «soplar a través».

Para reducir la contaminación se recirculan los gases filtrados al colector de admisión.

Al ser un motor de 2T aumenta el Blow-by debido al desgaste de las piezas del motor. Por lo que es importante monitorizar dicho desgaste.



Figura 12.: Blow-by

### **2.5.9 Medida de las condiciones ambientales.**

Las medidas más importantes que se toman en las instalaciones son la presión y la temperatura ambiente cada día de ensayo.

Para la toma de medida de la presión se utiliza un transductor y para la temperatura una termorresistencia.

### **2.5.10 Medida de emisiones contaminantes.**

#### Medida de los gases de escape.

Tomar una medida exacta de las emisiones contaminantes es fundamental, dada la restrictiva normativa existente.

Disponemos de un equipo Horiba MEXA 7100 DEGR, que permite la medida en concentración volumétrica (molar) de NO<sub>x</sub> (NO más NO<sub>2</sub>), CO, Hidrocarburos sin quemar totales (THC), CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, que, aunque no sea un contaminante, conocer su concentración en los gases de escape es importante para el análisis de los procesos de combustión y de formación de las emisiones que sí son contaminantes, especialmente el hollín.

Además el Horiba nos permite medir el porcentaje de EGR, calcula la diferencia de CO<sub>2</sub> entre la admisión y el escape.

Por último, el Horiba calcula la relación A/F y el parámetro lambda ( $\lambda$ ) mediante un método basado en la composición de los gases de escape.

#### Medida de humos (Opacímetro).

El opacímetro es el encargado de tomar la medida de cantidad de humos en los gases de escape, se utiliza un modelo 415 AVL. Cuya función es la de filtrar una cantidad de gases de escape por un filtro de papel.

### **2.5.11 Medida de posición del ángulo del cigüeñal.**

La posición del ángulo del cigüeñal se mide gracias a un encoder de la firma AVL, modelo A364. Su función óptica se basa en un sensor óptico capaz de captar las señales de un disco marcado con una pista de 720 pulsos para la información angular y que incluye un pulso de información por vuelta (trigger) para propósitos de sincronización. Por tanto, tiene una precisión de 0'5°.

### **2.5.12 Sistemas de control y adquisición de variables medias.**

Para el control y monitorización de las variables medias se utiliza una unidad Puma 5 Compact, cuyo software específico nos permite definir límites, control automático, adquisición de datos, etc.

Está formado por un PC, placa base Motorola 68030, panel K57, FEMS (encargados de recoger, transformar y enviar la información), ENCOM 300(control del motor, límite de variables, simulación de condiciones reales).

## **2.6 Metodología de ensayo.**

### **2.6.1 Definición de las condiciones de ensayo.**

Una vez que esta todo preparado para la realización de ensayos se procede a llevar al motor a régimen permanente con las condiciones a estudiar.

Los parámetros principales a regular son la temperatura del agua, aceite, combustible y la presión del cárter antes de iniciar el ensayo, ya que estas son críticas a la hora de realizar el ensayo y poder obtener resultados fiables.

También es importante controlar los parámetros que afectan al gasto másico y los que afectan a la inyección de combustible.

Las variables que controlan el gasto másico de aire:

- Presión de admisión.
- Temperatura de admisión.
- Presión de escape.
- Válvula de admisión y válvula de escape.
- Régimen de giro.

Los parámetros que afectan a la inyección de combustible son los siguientes:

- Presión de inyección.
- SOI (principal y piloto).
- Tiempo de inyección.
- Presión del retorno de inyección.

La presión del retorno de inyección se controla mediante una válvula manual de bola.

Los valores de apertura y cierre de válvulas, SOI y tiempo de inyección se introducen de forma manual en los ordenadores correspondientes que están interconectados con el ordenador que controla el PUMA.

### 2.6.2 Rutina para los ensayos de optimización.

Una vez definidos y estabilizados los valores de los parámetros de ensayo se procede a la introducción de metanos en la admisión. A través del analizador de gases HORIBA, se mide la cantidad de metano en la admisión y en el escape. Con esto se consigue medir la masa de aire fresco que se queda en la cámara de combustión, ya que la cantidad de metano que participa en la combustión se descompone totalmente.

Con la medida de metano establecida, se realizan las medidas de las variables instantáneas, mediante la cadena de medidas, y de las variables medias, con el programa de adquisición de datos Puma Concerto.



Figura. 13: Pantalla monitorización de Puma

Las medidas del Puma se transfieren a la unidad de recogida de datos en la que se encuentra el programa de postprocesado (Excel) desarrollado por el departamento. Una macro de hoja de cálculo, obtiene valores imprescindibles como la presión media instantánea (IMEP) entre otros valores. La visualización inicial de estos cálculos da una idea inicial del punto que permite la aceptación de las medidas establecidas en la matriz de ensayos.

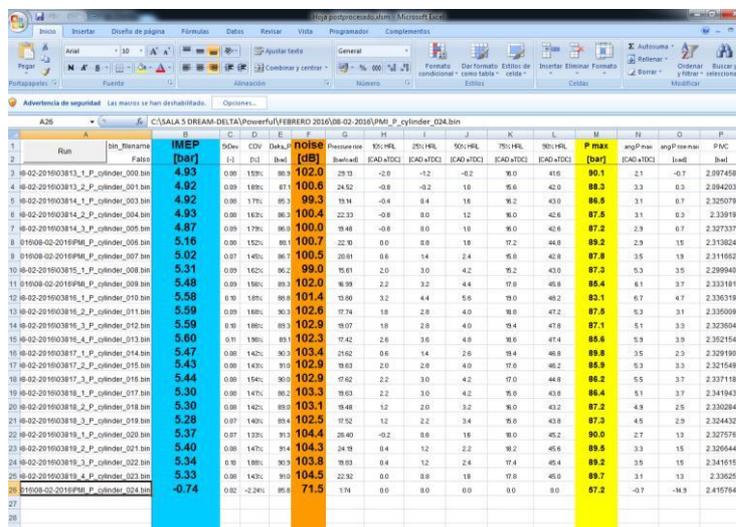


Figura. 14: Hoja de postprocesado.



Figura. 15: Medición de emisiones de los gases de escape.

Una vez recogidas todas las medidas de los elementos de la instalación, se genera un resumen de resultados. De este modo, el técnico puede tener acceso a los valores más relevantes del ensayo para su análisis.

COMBUSTION		MEDIDA METANO		CALCULO EMISIONES VALORES ESPECIFICOS (CORRECCION RSA)												
PMI	Pi	Ti	CSI	PMF	CH4 Adm	CH4 esp	CORRECTED RAW values					POWER indicated				
IMEP	Potencia Indicada	Torque Indicado	ISFC	PMF	CH4 Admision	CH4 Escape	NOx	CO2	CO	O2	HC	SNOx	Dry Soot	SHC	SCO	SCO2
[Bar]	[kW]	[Nm]	[g/kWh]	[Bar]	[ppm]	[ppm]	[ppm]	[%]	[ppm]	[%]	[ppm]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]	[g/kWh]
4.93	4.49	28.61	200.72	1.24	1344.71	212.40	112.8	10.5	2125.7	6.8	1534.1	1.06	0.72	4.34	12.13	941.30
4.92	4.49	28.58	219.03	1.32	1344.71	212.40	77.8	11.1	2284.1	5.9	2118.9	0.74	0.43	6.06	13.18	1008.27
4.93	4.49	28.61	222.76	1.34	1344.71	212.40	81.0	11.1	2408.2	5.9	1954.3	0.78	0.40	5.67	14.09	1021.86
4.87	4.45	28.31	222.84	1.29	1344.71	212.40	87.0	11.1	2240.3	6.0	2070.4	0.85	0.52	6.13	13.38	1041.03
5.31	6.46	30.83	193.14	1.30	1422.91	218.79	162.1	10.3	1374.7	7.2	1114.1	1.56	0.00	3.24	8.06	949.03
5.58	6.78	32.39	202.25	1.32	1255.76	202.41	113.2	11.2	4860.0	5.6	1039.7	0.97	0.05	2.70	25.47	921.09
5.59	6.80	32.49	200.06	1.31	1255.76	202.41	111.4	11.2	4230.0	5.6	1050.9	0.98	0.04	2.79	22.63	943.14
5.59	6.81	32.50	202.47	1.31	1255.76	202.41	107.2	11.3	4710.0	5.5	1104.0	0.93	0.07	2.88	24.79	934.31
5.60	6.81	32.53	203.11	1.34	1255.76	202.41	113.0	11.2	4490.0	5.7	1064.3	0.98	0.05	2.79	23.71	925.26
5.47	6.65	31.77	206.60	1.34	1255.76	202.41	127.8	11.1	3200.0	5.9	1093.7	1.14	0.06	2.94	17.37	946.27
5.43	6.61	31.54	205.74	1.30	1255.76	202.41	120.9	11.0	2630.8	6.0	1064.9	1.09	0.02	2.90	14.43	951.55
5.44	6.62	31.62	204.29	1.34	1255.76	202.41	117.7	11.1	2679.7	6.0	1089.1	1.07	0.02	2.99	14.82	961.35
5.30	6.45	30.82	202.97	1.33	1255.76	202.41	138.6	10.7	1772.3	6.6	1164.3	1.30	0.01	3.31	10.15	961.23
5.30	6.45	30.82	202.97	1.33	1255.76	202.41	137.6	10.7	1759.0	6.6	1200.1	1.29	0.01	3.40	10.04	959.75
5.28	6.43	30.70	204.03	1.32	1255.76	202.41	137.5	10.7	1737.5	6.5	1184.6	1.29	0.01	3.35	9.92	961.33
5.37	6.53	31.17	208.79	1.33	1255.76	202.41	140.3	11.1	2741.2	5.9	1519.8	1.28	0.08	4.19	15.24	967.02
5.40	6.58	31.40	204.70	1.37	1255.76	202.41	131.1	11.1	2410.8	6.0	1433.7	1.20	0.08	3.96	13.45	969.24
5.34	6.49	31.00	206.85	1.30	1255.76	202.41	133.2	10.9	2152.5	6.2	1409.6	1.23	0.02	3.91	12.05	960.18
5.33	6.49	30.98	210.48	1.31	1255.76	202.41	154.1	10.7	1898.2	6.5	1334.4	1.43	0.03	3.74	10.74	953.26

Figura 16.: Hoja de resumen de resultados.

Más tarde utilizaremos como herramienta fundamental para el procesado de la información el programa Calmec.

## 2.7 Calmec.

CALMEC es una herramienta de diagnóstico de la combustión diseñada y programada por el CMT. Para su funcionamiento, es imprescindible aportar las diferentes medidas de presión en el interior del cilindro (de ahí la enorme importancia de su correcta medición) para que el programa a partir de ellas y, mediante la resolución de la primera ley de la termodinámica, proporcione los resultados acerca de la evolución de la combustión. Sin embargo, para que este programa calcule, son necesarios la incorporación de unos sub-modelos.

En lo que respecta a la Ley de combustión, ésta se obtiene de la ecuación de conservación de la energía como posteriormente se profundizará. Se avanza que el calor liberado por el fenómeno de la combustión se reparte entre las variaciones de la energía interna del gas, entre la evaporación del combustible, la transmisión de calor a las paredes y del trabajo realizado por el fluido

Una vez se le han aportado las variables de entrada al programa (especialmente la presión instantánea en el cilindro), éste desprende resultados tanto medios como instantáneos. De entre toda la cantidad de los mismos, especialmente remarcables para este trabajo van a ser:

- Perfil de liberación de calor (dFQL): Aporta conocimiento acerca de la evolución de la combustión
- Temperatura de la cámara
- Composición de la mezcla en cada instante de tiempo: De este resultado podemos deducir la masa de combustible que ha reaccionado en cada posición del cigüeñal
- Inicio de la combustión
- Velocidad de la combustión
- Transmisión de calor en la cámara y en las pipas

Sin embargo, la gran importancia de este programa y, sobre todo, su utilidad, se desprenden gracias a que opera mediante la división en distintos sub-modelos que aportan informaciones sobre diferentes términos referidos al calor

Sin embargo, la gran importancia de este programa y, sobre todo, su utilidad, se desprenden gracias a que opera mediante la división en distintos sub-modelos que aportan informaciones sobre diferentes términos referidos al calor. Se va a prestar verdadera atención a la descripción del submodelo encargado de calcular el fenómeno de la transmisión de calor, pues es éste el que más útil fue para el presente proyecto.

El primer submodelo que se va a detallar a continuación es el encargado de calcular el calor liberado durante la combustión. También recibe el nombre de Ley de Quemado.

El modelo que sufre las hipótesis anteriores genera un balance termodinámico en la cámara durante su ciclo cerrado a partir de la ley de liberación de calor. Cuando se resuelve el primer principio, haciendo uso de dicha ley y aplicando la ecuación de los gases perfectos, el modelo determinará inmediatamente las presiones y temperaturas en cada instante.

Este submodelo se ha diseñado con el objetivo de poder determinar tanto las temperaturas en la pared como el flujo de calor medio entre las respectivas partes del motor. Una hipótesis trascendente es que el motor se va a considerar como una malla térmica que se constituye por una cantidad finita de nodos, unidos unos entre otros por una conductancia térmica media. Una vez que se defina la malla nodal, sobre cada nodo se podrá aplicar un balance energético estacionario.

El modelo nodal simplificado que es planteando se puede representar como en la figura :

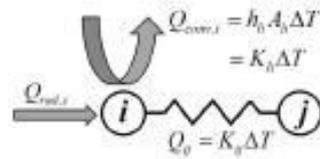


Figura 17: Modelo nodal.

## 2.8 Conclusiones.

Para concluir este capítulo se puede decir que para la realización de este proyecto de investigación han sido necesarias herramientas tan poco comunes como son el acondicionador de combustible, el acondicionador de refrigeración de agua de los captadores de presión, remansos de admisión, compresores externos al motor, software como "PUMA", "INCA" etc.

Por ello todas las herramientas nombradas a lo largo de este capítulo son necesarias para poder obtener con precisión un control absoluto del motor, dentro de nuestras posibilidades, ya que al ser un motor en estado experimental y no tener conocimientos de funcionamiento es muy difícil saber a ciencia cierta cómo afecta una mínima variación de los parámetros. Esto hace que la precisión de dichas herramientas y la rigurosidad en las mediciones sean fundamentales para obtener resultados realistas y precisos.

Con posterioridad a la finalización sería de interés añadir varias herramientas más, como una subenfriadora de combustible para poder eliminar las variaciones de temperatura en el circuito de combustible evitando llegar de esta forma a que el combustible alcance temperaturas demasiado elevadas, con lo que provoque la cavitación del mismo, consiguiendo tener menos errores de medida, y el SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) que permite conocer a ciencia cierta el tamaño de partículas que se están emitiendo en tiempo real, y así poder ser aún más precisos.



# CAPÍTULO 3

## Definición del plan de ensayo

**Contenido:**

### **3. DEFINICIÓN DEL PLAN DE ENSAYO**

#### **3.1 Introducción**

#### **3.2 Metodología de implementación de la estrategia PPC**

##### 3.3.1 Introducción

##### 3.3.2 Matrices de ensayo

#### **3.4 Conclusiones**



### 3.1 Introducción.

El plan de ensayo realizado se denomina enfoque “COST”, fundamentalmente se basa el mantener constantes todos los parámetros menos 1 de ellos. Dicha metodología de ensayo nos permite poder observar las variaciones finales y poder obtener conclusiones con la variación de cada parámetro, es la metodología más usada en investigación. Aunque por contrapartida presenta varios inconvenientes.

- Se deben de realizar una gran cantidad de ensayos.
- Las conclusiones de los resultados son muy limitados para una configuración muy concreta.
- La interacción entre los factores no se aprecia.
- Suele ser inviable por tiempo o coste.

Podríamos sacar conclusiones interpolando resultados, pero este procedimiento no es exacto, ya que sabemos que el motor puede presentar comportamientos irregulares en ciertos puntos característicos.

Los experimentos pueden realizarse de una manera planificada y ordenada o intuitiva y desordenada. Ambos igual de validos aunque para evitar futuros problemas el procedimiento seleccionado es el primero de ellos.

Bajo la definición de diseño de experimentos, se concretan las técnicas que permiten realizar los experimentos de una manera ordenada con el fin de obtener resultados fiables. El objetivo es averiguar si unos determinados factores influyen significativamente en la variable de interés y de ser así poder hallar un punto óptimo.

Los modelos de diseños de experimentos son modelos estadísticos y si unos determinados factores influyen en la variable de interés cuantificar dicha relación.

Para que la metodología de diseño de experimentos sea eficaz es fundamental que el experimento esté bien diseñado.

Los motivos por los que se realiza este tipo de experimentos son:

- Concretar las principales causas de variación en el resultado.
- Encontrar las condiciones donde se obtienen los valores más extremos de una variable.
- Poder comparar distintas respuestas con variables controladas.
- Obtener un modelo estadístico-matemático que permita hacer predicciones de respuestas futuras.

## 3.2 Estudio del concepto PPC con gasolina.

### 3.2.1 Descripción del problema y objetivos.

El objetivo principal es entender el proceso de combustión PPC en gasolina. Mediante el uso de distintas estrategias de inyección, grados de carga, presión de admisión, presión de escape y posiciones angulares se ha de estudiar las variaciones sobre las emisiones de los gases contaminantes, grado de retención, porcentaje residual dentro del cilindro, consumo medio etc.

### 3.2.2 Variables de respuesta y factor experimental.

Con el fin de poder responder a las preguntas anteriormente mencionadas, se han seleccionado las siguientes variables de respuesta:

- Rendimiento de Retención (TR): para su correcta medición se utiliza un innovador procedimiento diseñado por el CMT y Renault, el cual no puede ser descrito por razones de confidencialidad. Este valor indica el porcentaje de aire fresco se queda retenido en el cilindro tras el proceso de admisión, o lo que es lo mismo nos indica la cantidad de aire que se pierde por cortocircuito
- Porcentajes residuales (IGR): indica el porcentaje de residuos que permanecen en el cilindro tras el barrido o vaciado de este. Su objetivo es minimizar dicho factor y para calcularlo se precisa el rendimiento de retención y otros tantos parámetros de la combustión.
- Gasto de aire (Qaire): es la cantidad total que se introduce al cilindro. Para su medida se utiliza un medidor de caudal volumétrico
- Consumo indicado de combustible (ISFC): es la cantidad total de masa de combustible inyectada en el cilindro

Como veremos durante el proceso de optimización no será posible optimizar todos los valores a la vez, ya que presenta una serie de compromisos entre ellos. Se deberá de fijar un objetivo fundamental y tomar aquellos que más se aproximen a este, para valorar el grado de optimización nos fijaremos en los siguientes parámetros:

- **NOx:** El analizador de gases Horiba es el encargado de obtener la medida de óxidos de nitrógeno de la muestra recogida del colector de escape.
- **CO:** La medida de CO se obtiene, al igual que la de NOx, con el analizador Horiba.
- **HC:** La medida de HC se obtiene, al igual que la de NOx y CO, con el analizador Horiba. Estas medidas de gases son importantes de cara al ciclo de homologación de la unión europea, cada vez más restrictivo. Por ello, se tendrán en cuenta a la hora de realizar los ensayos.
- **Humos:** La medida de Humos se obtiene con el opacímetro y al igual que las anteriores son importantes de cara al ciclo de homologación de la unión europea.

**Factores experimentales.**

Los factores experimentales que se desean estudiar y que serán modificados durante el diseño de experimentos son:

- **Presión de admisión:** se ha escogido como rango de estudio 2 presiones de admisión para los distintos punto de grado de carga: 1.295 bar (baja carga, 3.1bar IMEP), 1.7 bar (media carga, 5.5bar IMEP).
- **Delta de presión:** Es la diferencia entre la presión de admisión y la presión de escape, y determina en gran medida la “respiración” de un motor 2T. Se ha escogido un rango para el delta de presión entre 0’21bar (baja carga, 3.1bar IMEP) y 0.32bar (media carga, 5.5bar IMEP. Se ha seleccionado este rango teniendo conocimiento de que en estos puntos de funcionamiento, diferencias de presión inferiores reducen demasiado el gasto de aire fresco, con respecto a lo que se requiere para que la masa de combustible inyectada queme de forma adecuada (valores muy bajos de aire fresco en el cilindro provocan un enriquecimiento de la mezcla que ocasiona un aumento en el nivel de hollín por encima del valor requerido).
- **Temperatura de admisión:** Temperatura en el colector de admisión para los ensayo es de 45°C.
- **VVT Admisión:** Representa el ángulo de desfase de la apertura de la válvula de admisión con respecto a su valor nominal. Puede ser variada entre 0 y 30 grados (ver Figura 3.4 gráficas azules). Es importante tener en cuenta que el ángulo de cierre de la válvula de admisión determina la relación de compresión efectiva (o relación de compresión real) de un motor 2T.
- **VVT Escape:** Es el ángulo de diferencia entre la apertura de la válvula de escape respecto de su propio valor nominal. Tiene un rango de 30 grados. Esta variable define la relación de expansión efectiva de un motor de 2T

A continuación se muestra la posición de ambos árboles de levas para los distintos grados de carga:

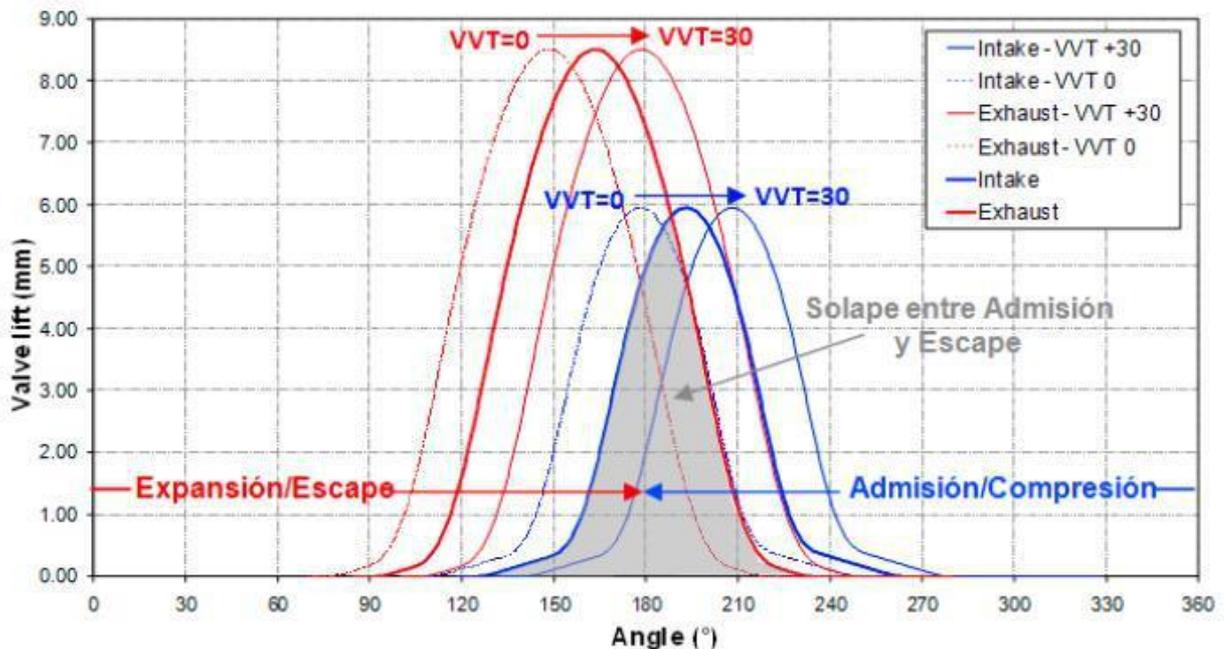


Figura 18: Ley de levantamiento de válvulas.

- **Cruce de válvulas (Olap):** Es el solapamiento entre el levantamiento de las válvulas de admisión y las válvulas de escape. Dicho solapamiento produce el efecto comúnmente denominado cruce de válvulas. Un cruce de válvulas amplio permite al motor alcanzar unas rpm más altas, reduciendo la potencia y el par motor. Por el contrario, con un cruce de válvulas corto, permiten un rendimiento alto a bajos regímenes. Para los ensayos realizados hemos optado por:
  - 78.4 CAD en 10.4bar IMEP.
  - 63.4 CAD en 5.5bar IMEP.
  - 62.4 CAD en 3.1bar IMEP.
  
- **Egr:** Recirculación de un porcentaje de los gases de escape (%EGR) hacia la admisión para reducir las emisiones de NOx. Para los ensayos realizados hemos optado por:
  - 43.5% en 10.4bar IMEP.
  - 33.5% en 5.5bar IMEP.
  - 15% en 3.1bar IMEP.

## 3.3 Metodología de implementación de la estrategia PPC.

### 3.3.1 Introducción.

El trabajo de investigación se realiza en 2 puntos de cargas diferentes, correspondientes a estudios básicos del concepto PPC de gasolina. Los puntos de funcionamiento seleccionados para realizar los ensayos son uno a 3,1 de pmi y otro a 5,5 pmi, todos ellos para distintas velocidades (1250, 1500, 1750, 200).

Antes de realizar ensayos con la nueva estrategia de PPC se realizó un periodo de estudio con el método CDC (Comun Diesel Combustion) y una vez tomado los valores de referencia del motor pasamos a poner en práctica la nueva estrategia. La presión de admisión ( $P_I$ ), la tasa de EGR, la diferencia de presión entre la admisión y escape ( $\Delta P$ ), y el cruce de válvulas (Olap) y el avance de la apertura de escape (EVO) son los factores de entrada que describen la renovación de la carga. Por otro lado, el inicio real de la inyección ("SOI1", Start of Ignition), inicio real de la 2ª inyección SOI2, inicio real de la 3ª inyección SOI3 y la presión de inyección son los parámetros que describen las condiciones de inyección a regular para la optimización. Se utilizaron los modelos matemáticos de segundo orden para encontrar condiciones adecuadas en cilindros, principalmente en términos de la concentración de oxígeno ( $YO_2$ , IVC) y la temperatura en el IVC ( $T_{IVC}$ ), para asegurar la ignición adecuada alrededor TDC cuando se opera con el concepto de PPC.

Se utilizó una estrategia de inyección múltiple (inyección triple o doble) en todos los estudios presentados en esta investigación, con una tasa de abastecimiento de combustible fijo que proporciona el objetivo requerido de IMEP en cada caso con el CA50 óptimo en cada carga. La cantidad inyectada total se mantiene constante para todas las pruebas a lo largo de los diferentes estudios. Entonces con la inyección principal SoE2, el Timing de la cual controla principalmente la combustión, se hace un barrido cada 2 CAD para cada estudio; en un rango definido teniendo en cuenta la aparición de Knocking en la combustión o el límite de humo y el deterioro de la estabilidad de la combustión como las principales limitaciones.

Por medio de altos puntos de grado de carga se utiliza una triple inyección con el fin de evitar una tendencia al Knocking en la combustión, como en el caso de operación a medio o bajo grado de carga las inyecciones tanto triples y dobles se evalúan con el fin de encontrar el patrón de inyección más adecuado. Por último, se sabe de antemano que la utilización de doble inyección, retirando la primera colocada en -60 CAD TDC, evita excesivamente altas emisiones de HC.

En las matrices de ensayos definimos los rangos de las variables modificadas con el fin de estudiar cual era el punto óptimo en el estudio paramétrico. Se ha descrito el rango en el cual se ha movido dicha variable para los distintos ensayos de barrido. De esta manera se puede observar que modificaciones en las variables son las más significativas.

### 3.3.2 Matrices de ensayo.

Inyección				
	Sol 1	Sol 2	Sol 3	IP
<b>1250-3.1</b>	0	[28-36]	4	400
<b>1500-3.1</b>	0	[34-42]	4	400
<b>1750-3.1</b>	0	[38-48]	[4-18]	400
<b>2000-3.1</b>	0	[40-44]	10	400
<b>1250-5.5</b>	-60	[36-42]	4	400
<b>1500-5.5</b>	-60	[36-48]	4	600
<b>1750-5.5</b>	-60	[38-44]	[2-10]	[600-700]
<b>2000-5.5</b>	-60	[42-48]	[6-12]	600

Para los ensayos a baja carga, 3.1, el se ha optado por una estrategia de 2 inyecciones y para los de media carga el SOI1 constante con un avance de 60 °, el SOI2 es un parámetro muy influyente por los que se han realizado barridos en todos los punto y con un rango considerable de puntos, y para el SOI3 se han realizado menos y ya que este parámetro está más limitado y su influencia es menos significativa.

<b>Renovación de carga</b>					
	<b>P adm</b>	<b>Delta P</b>	<b>EGR</b>	<b>EVO</b>	<b>Olap</b>
<b>1250-3.1</b>	1.5	[0.17-0.18]	15%	177.5	59.4
<b>1500-3.1</b>	1.5	[0.15-0.16]	15%	177.5	64.4
<b>1750-3.1</b>	1.5	[0.15-0.19]	15-24%	177.5	[64-70]
<b>2000-3.1</b>	1.5	[0.23-0.25]	25%	177.5	66.4
<b>1250-5.5</b>	1.7	[0.24-0.25]	31%	171.5	63.4
<b>1500-5.5</b>	1.7	[0.28]	33%	171.5	63.4
<b>1750-5.5</b>	1.7	[0.28-0.3]	28-32%	171.5	[63-65]
<b>2000-5.5</b>	1.7	[0.4-0.47]	33%	171.5	63

Para los parámetros de renovación de la carga observamos que la presión de admisión es constante dependiendo de la carga del propio ensayo, para ensayos a 3.1 pmi corresponden 1.5 bar y para 5.5 pmi se ensaya a 1.7 bar. El delta P es la diferencia de presión entre la entrada y la salida. El EGR aumenta conforme aumentamos la carga y el régimen y por último la posición de las válvulas de admisión y escape y su correspondiente tiempo de cortocircuito definido por el Olap son parámetros dentro de un rango bastante estrecho.

### **3.4 Conclusión.**

Como se ha explicado anterior se ha optado por un método de ensayo de tipo paramétrico donde se modifica un solo parámetro manteniendo los demás constantes y así poder visualizar el efecto del mismo en los resultado, haciendo hincapié en las emisiones contaminantes (muy importantes para el medio ambiente), la eficiencia energética y disminución del consumo, entre otros, los cuales son los que promueven el interés de este proyecto.

Como el comportamiento del motor no es intuitivo, ya que es un prototipo 2T de Renault y por tanto no comercializado, este tipo de ensayo ayuda a la prosperidad del proyecto consiguiendo un diseño de experimento que ayude a la predicción de puntos de ensayo y así disminuir el coste del tiempo en hallar puntos óptimos.



# CAPÍTULO 4

## Análisis de resultados

**Contenido:**

### **4. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **4.1 Introducción**

#### **4.2 Configuración experimental**

4.2.1 Arquitectura del motor y test de prueba

4.2.2 Modelo multidimensional del motor

#### **4.3 Análisis de resultados**

4.3.1 Efectos de la inyección en el SoC, RoHR y CA50

4.3.2 Efectos de la inyección en el Ruido y CoV

4.3.3 Efectos de la inyección en las emisiones de contaminantes

4.3.4 Efectos de la Presión de inyección y diferentes porcentajes de combustible en RoHR

4.3.5 Efectos de la SoE2 en la eficiencia de combustión y en la eficiencia indicada

4.3.6 Análisis comparativo entre el concepto gasolina PPC y CDC

4.3.7 Análisis de condiciones locales de operación con el concepto PPC y estrategia de triple inyección a media carga (5.5 bar IMEP)

#### **4.4 Conclusiones.**



## 4.1 Introducción.

El objetivo principal es la obtención de un punto de funcionamiento óptimo, el cual tendrá unas determinadas características elegidas tras un estudio paramétrico de todas ellas. El procedimiento consiste en variar solo una de las características y realizar un barrido de distintos puntos sin modificar el resto. Principalmente se modificaran los valores: régimen, presión media indicada, SOII1, SOII2, SOII-3, VVT x-x, DP y EGR. Para más tarde poder realizar una gráfica con todos los puntos ensayados, donde en el eje de coordenadas X representaremos los NOx y en el eje de coordenadas Y el consumo obtenido en el Horiba.

En la siguiente grafica se observan los rangos de los barridos de las distintas variables.

DATOS IDENTIFICAR ENSAYO			Start_iny1	Start_iny3	Start_iny4	IP#bar	P_AIR_ADM#bar	EGR#%	EVO		
ID	Fecha de ensayo	Nombre Ensayo	Avance piloto 1 [grados]	Avance main [grados]	Avance post 1 [grados]	IP [bar]	P adm [bar]	delta P	EGR RATE [%]	EVO [deg]	olap
1250-3.1	25/06/2015	03612_1	0	-30	-4	400	1.5	0.178	15.28	130.60	59.4
1250-3.1	25/06/2015	03616_1	0	-36	-4	400	1.499	0.18	15.17	130.60	59.4
1500-3.1	17/06/2015	03596_5	0	-40	-4	400	1.505	0.152	14.91	137.60	64.4
1500-3.1	17/06/2015	03600_3	0	-42	-4	400	1.497	0.148	15.04	137.60	64.4
1750-3.1	26/11/2015	03744_1	0	-42	-12	400	1.501	0.183	17.17	137.60	64.4
1750-3.1	26/11/2015	03748_3	0	-42	-12	400	1.494	0.178	24.65	137.60	64.4
2000-3.1	22/12/2015	03789_3	0	-42	-10	400	1.5	0.251	24.76	139.60	66.4
2000-3.1	22/12/2015	03790_3	0	-40	-10	400	1.499	0.251	24.64	139.60	66.4
1250-5.5	26/06/2015	03621_2	0	-38	-4	600	1.7	0.25	31.41	130.60	63.4
1250-5.5	26/06/2015	03618_1	0	-42	-4	600	1.698	0.275	33.59	130.60	63.4
1500-5.5	29/06/2015	03628_3	0	-44	-4	600	1.701	0.281	33.52	130.60	63.4
1500-5.5	16/06/2015	03592_1	-60	-46	-4	600	1.699	0.277	33.33	130.60	63.4
1750-5.5	14/07/2015	03643_4	-60	-42	-4	600	1.708	0.285	33.91	130.60	63.4
1750-5.5	13/11/2015	03725_1	-60	-42	-4	600	1.698	0.278	31.87	128.60	61.4
2000-5.5	10/12/2015	03776_3	-60	-44	-8	600	1.699	0.399	33.82	130.60	63.4
2000-5.5	10/12/2015	03778_1	-60	-44	-12	600	1.698	0.397	33.50	130.60	63.4

Datos ensayos.1

De esta gráfica será sencillo obtener el punto óptimo ya que será el que más se aproxime a la coordenada (0,0) puesto que será la que menos consuma y la que menos contamine. Todos aquellos puntos que se observe que dan resultados con una desviación de más de un 30-40 % sin ninguna tendencia se tomaran como erróneos y no se incluirán como posibles resultados del estudio.

También se ha de comentar que hay unos límites en referencia a los contaminantes NOx para cada punto de trabajo cuyo rango varía entre [100-60 ppm]

Se realizaran tantas graficas como puntos de trabajo, un punto de trabajo hace referencia a un régimen y presión de escape determinados, para así poder estudiar cómo afectan las variaciones dependiendo del punto de carga y poder generar mejor los mapas de control.

Una vez realizadas tantas graficas como puntos de trabajo se compararan para un mismo punto la grafica de los ensayos iniciales con la de los ensayos finales donde ya se han ido modificando los parámetros para optimizar los resultados. De este modo se podrá comprobar de manera sencilla las mejoras introducidas.

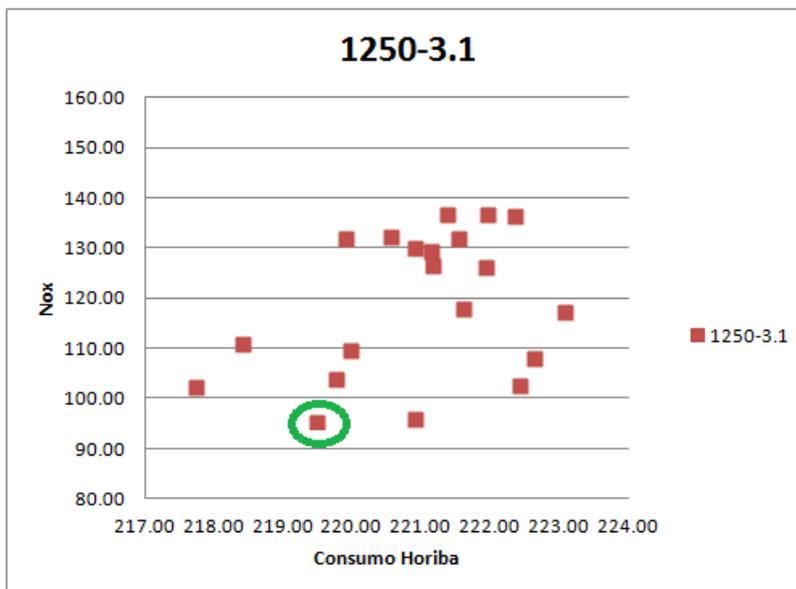
Los parámetros a controlar principalmente son los NOx y el consumo, pero también estudiaremos la evolución de los CO, HC, humos y el rendimiento de combustión. Ya que puede que estos puntos óptimos no mantengan una relación directa y puede que no sea razonable reducir tanto el consumo y los NOx si el resto de parámetros nos dan valores fuera de rango.

Más tarde utilizaremos el programa Calmec, ya explicado anteriormente, para estudiar el tipo de combustión en el cilindro. Es una herramienta muy útil e interesante de estudiar, ya que puede ser que en algunos casos sea una combustión demasiado inestable, y no nos sea válida por las irregularidades que presenta.

## 4.2 Selección de óptimos.

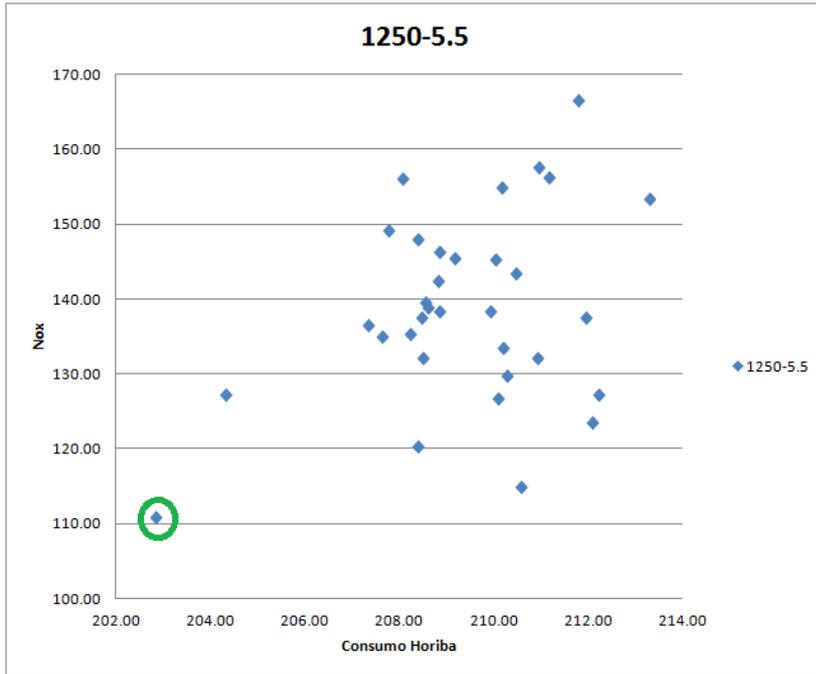
Para la selección de óptimos hemos optado por utilizar graficas de nubes de puntos para poder visualizar todos los ensayos a la vez y tener de un solo vistazo la tendencia que siguen.

### 4.2.1 Graficas



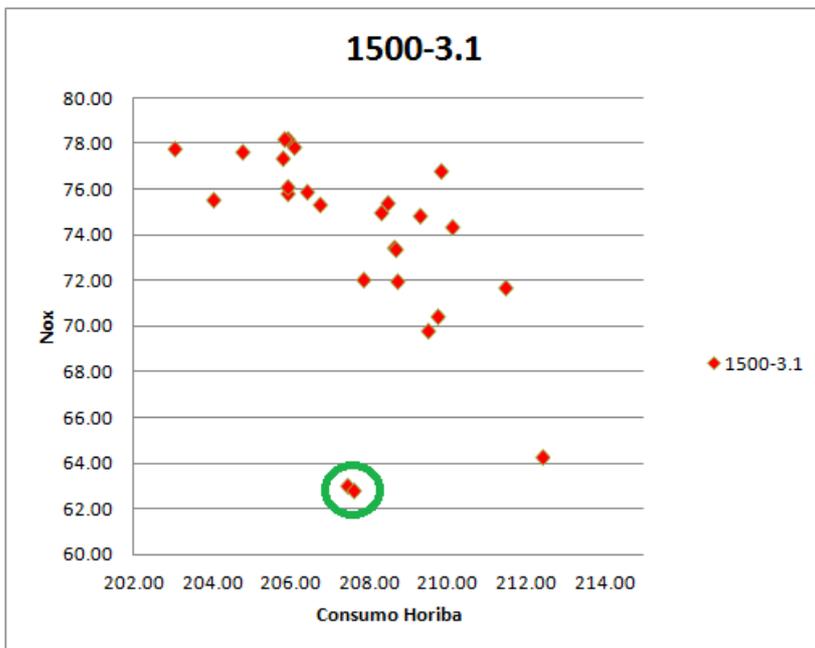
Grafica 1

Para este determinado punto de trabajo hemos seleccionado ese punto como el óptimo cuyos parámetros son: SOI2-36\_SOI3-4\_VVT12-8. El cual debe estar por debajo de 100 ppm de NoX para cumplir con los requisitos de contaminación. Se observa que la mayor concentración de punto de trabajos se encuentra entorno a 221 g/kWh y 130 mg/s de NOx , el punto seleccionado como optimo mejora ambos parámetros.



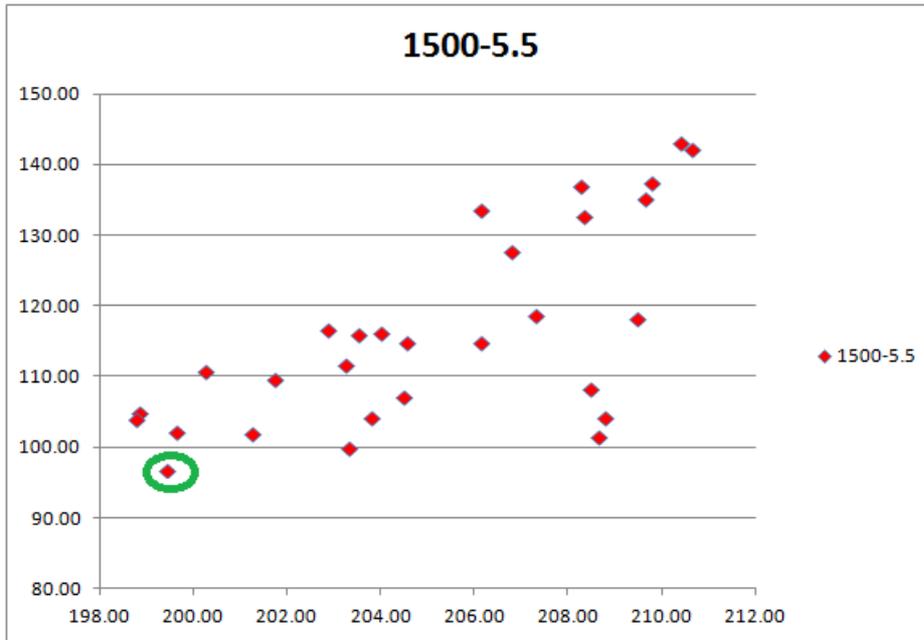
Grafica 2

Ensayo seleccionado como optimo: SOI2-42\_SOI3-4\_VVT8-8, dicho punto se encuentra muy alejado de la nube de puntos donde se concentra la mayoría de ensayos. Esto nos indica que este punto dispone de una configuración muy interesante



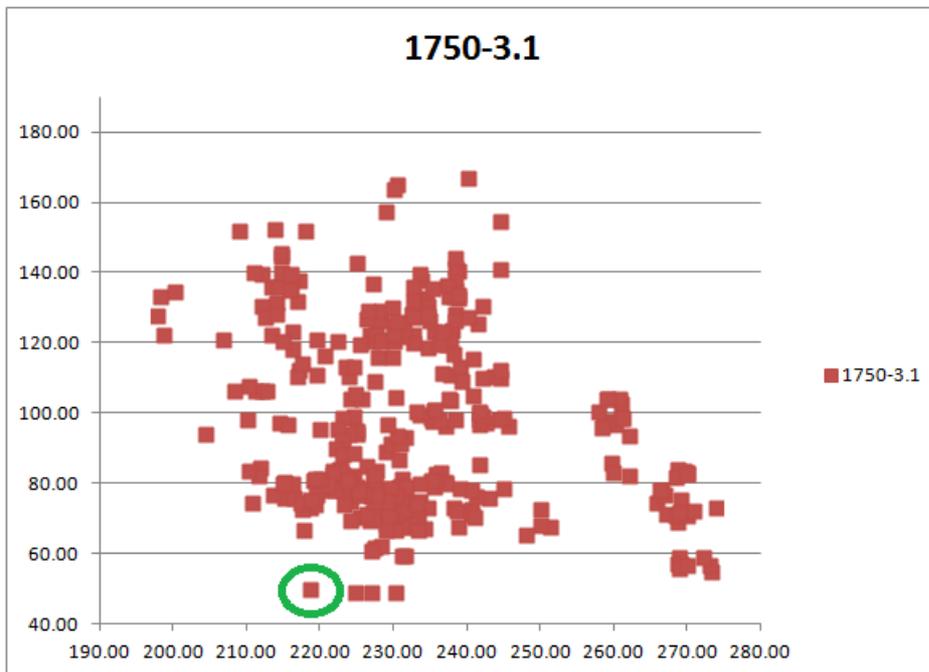
Grafica 3

Ensayo SOI2-42\_SOI3-4\_VVT14-15. Se encuentra en



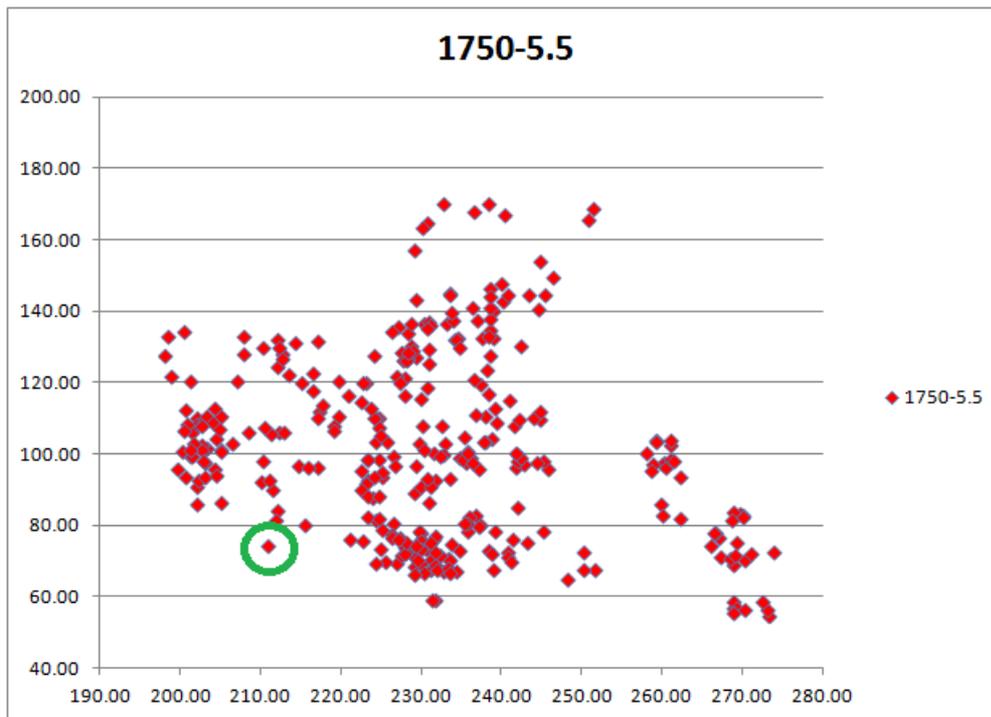
Grafica 4

Ensayo SOI1-60\_SOI2-46\_SOI3-4\_VVT8-8



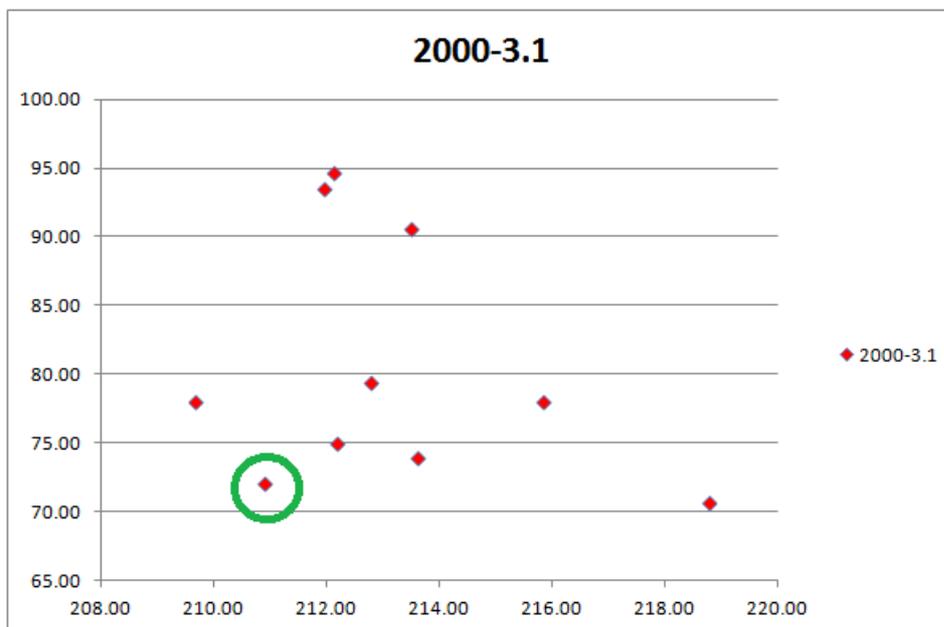
Grafica 5

Ensayo SOI2-42\_SOI3-12\_EGR-25



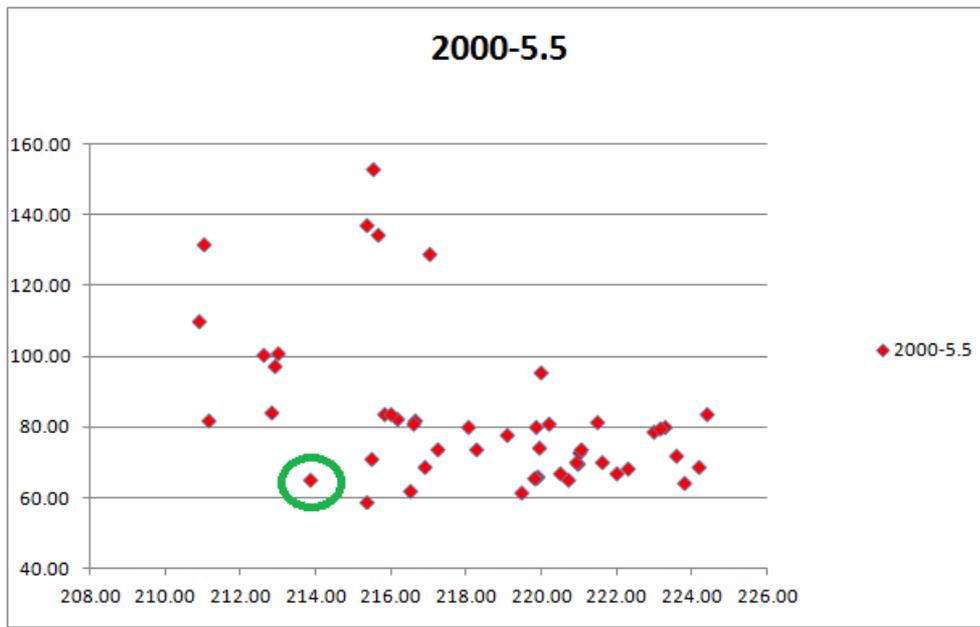
Grafica 6

Ensayo: SOI1-60\_SOI2-42\_SOI3-4\_VVT8-6



Grafica 7

Ensayo: SOI2-40\_SOI3-10\_VVT14-17



Grafica 8

Ensayo SOI1-60\_SOI2-42\_SOI3-10\_DP0.400

Como se observa hemos elegido los puntos óptimos más cercanos al eje de coordenada nulo con la condición de cumplir los mínimos de contaminantes NOx.

Estos son para cada régimen y carga:

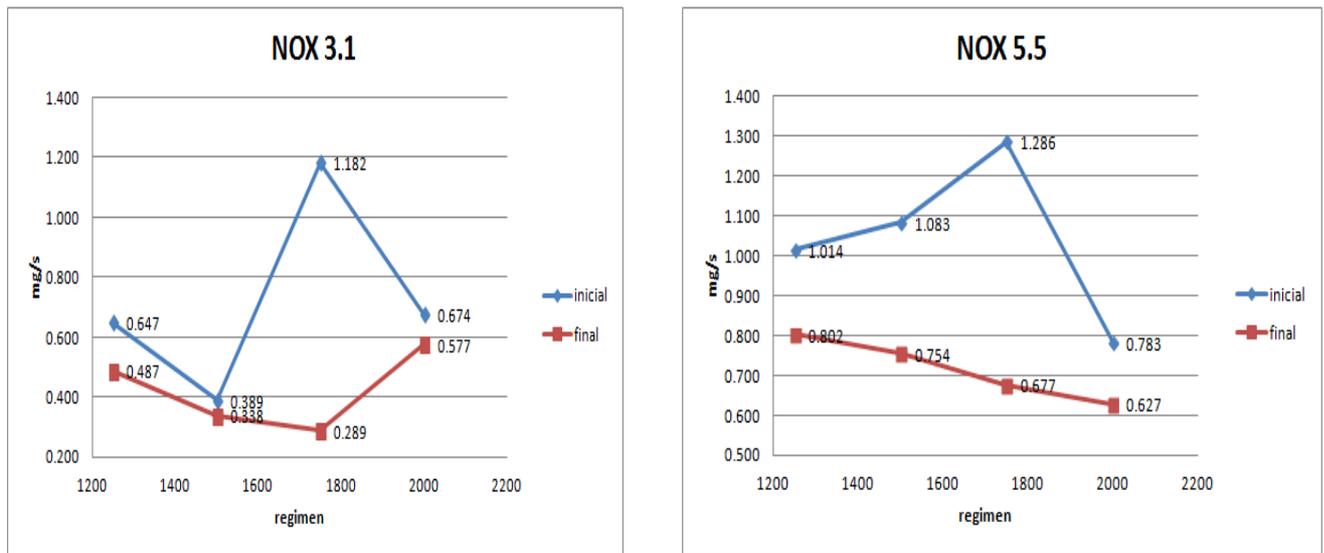
<b>1250-3.1</b>	100	<b>1250-5.5</b>	120
<b>1500-3.1</b>	80	<b>1500-5.5</b>	100
<b>1750-3.1</b>	80	<b>1750-5.5</b>	80
<b>2000-3.1</b>	80	<b>200-5.5</b>	80

### 4.3 Comparación puntos iniciales y óptimos.

Se va a proceder a compara todos los puntos óptimos e iniciales a una misma carga para todos los regímenes ensayados para poder comparar los resultados de un solo vistazo, y de esta manera facilitar las conclusiones.

#### 4.3.1 NOx

Este es una de las principales variable sobre la que hemos basado nuestro estudio, ya que unos de los requisitos fundamentales es la de reducir los contaminantes en los motores de 2T



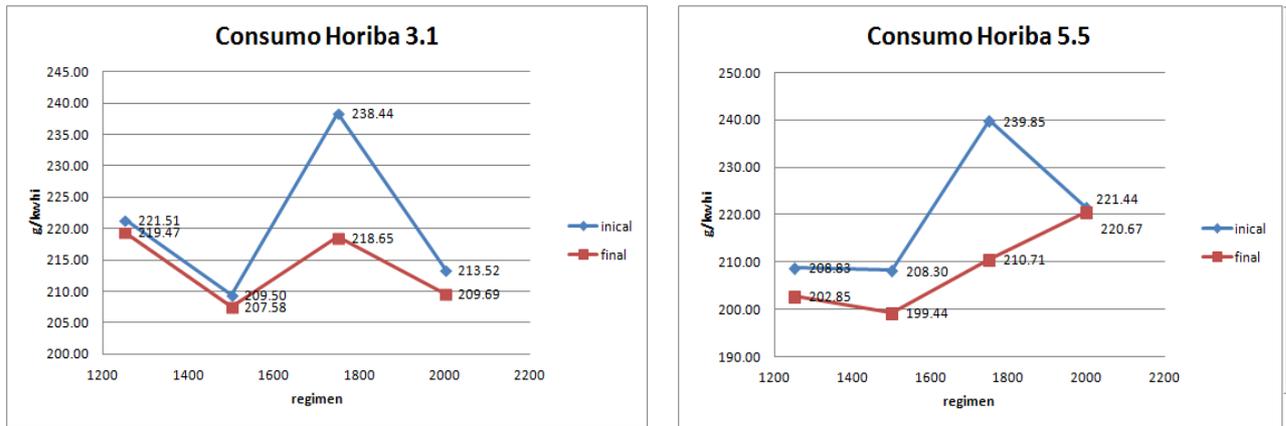
Grafica 9

En esta imagen podemos observar que los contaminantes NOx se han reducido desde el inicio de los ensayos, con los parámetros predeterminados iniciales, hasta los parámetros finales tras la optimización, tanto para ensayos a 3.1 y 5.5 bares de presión. Por tanto, podemos afirmar que los resultados de la optimización en referencia a la contaminación han sido positivos aunque todavía deberemos comprobar cómo ha afectado dicha mejora en el resto de de parámetros para poder afirmar que estas mejoras sean validas, ya que si para mejorar en NOx debemos sacrificar desmesuradamente el resto de parámetros no será razonable realizar tal mejora

Esta mejora era evidente ya que la manera de obtener el optimo era eligiendo este como aquel punto que más se acercara al eje de coordenadas (0,0) y de esta manera reducir tanto los NOx como el consumo en comparación con el punto inicial de funcionamiento, aunque es verdad que en ciertos puntos de trabajo no se aprecian mejoras muy significativas debido a que el motor funcionan en un corto margen de variación.

En la grafica de 3.1 pmi se intuye que la tendencia de los NOX aumenta según aumenta el régimen para los ensayos optimizados, todo lo contrario para los ensayos de a 5.5 pmi donde un aumento del régimen supone un una reducción de los NOX

### 4.3.2 Consumo



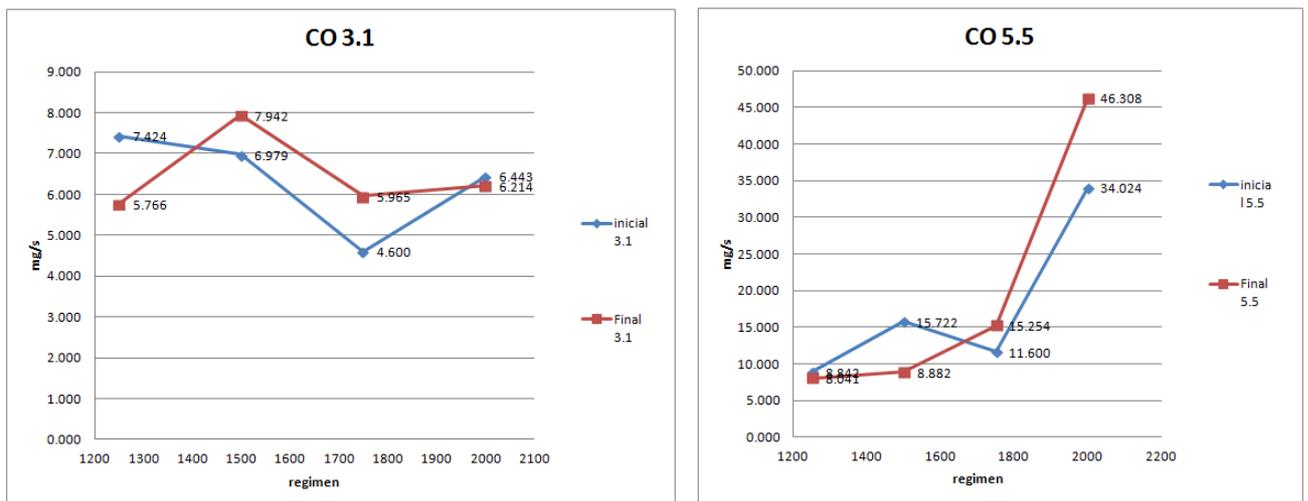
Grafica 10

Se observa que ambos caso, inicial y final, mantienen una misma tendencia lo que nos indica que son graficas fiables.

Como ya se ha comentado es obvio la mejora de este parámetro debido al procedimiento utilizado para la elección de los óptimos.

Además podemos afirmar que para ensayos a 5.5 pmi el consumo es directamente proporcional al régimen.

### 4.3.3 CO

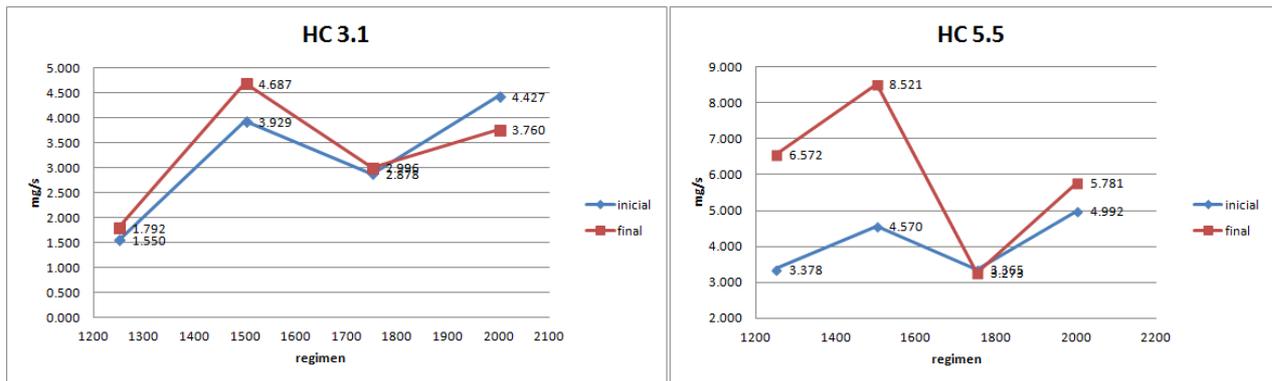


Grafica 11

Observamos que este parámetro es más irregular, además de que a 5.5 bar de presión se observa que conforme aumenta el régimen el CO producido es superior en los casos optimizados que en los iniciales. Por lo que deberemos comprobar si estos valores son validos según la legislación.

En los ensayos a 5.5 se comprueba que la producción de CO a partir de 1800 rpm se dispara, lo que seguramente este fuera del rango legal de contaminación de CO.

### 4.3.4 HC



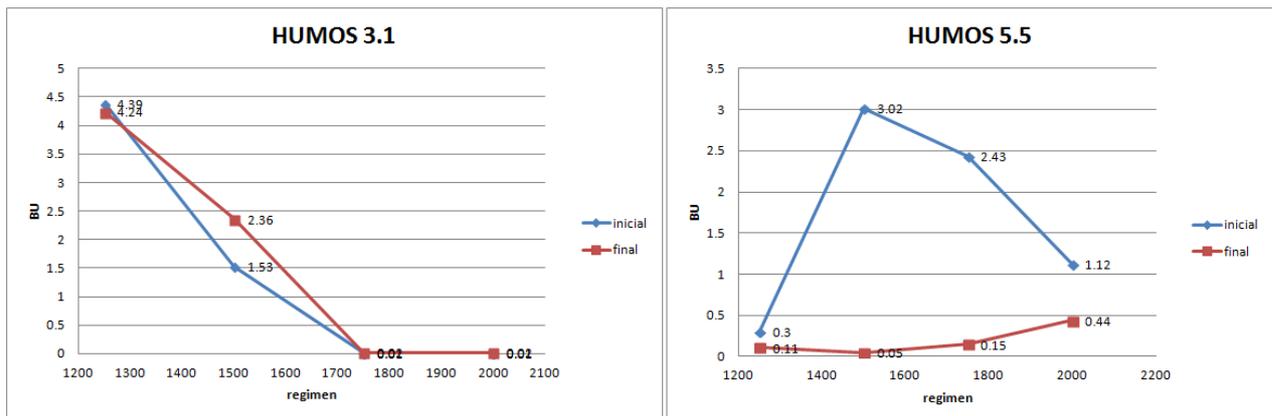
Gráfica 12

Se ha de comentar que este parámetro es muy inestable y complicado de medir con exactitud, aun así se puede comprobar que mantienen una evolución muy parecida para ambos caso.

Para 3.1 pmi se produce un cruce las tendencias, comienzan contaminando mas los ensayos optimizados pero a partir de 1600 rpm los ensayos optimizados mejoran su producción de HC.

Para 5.5 no se puede decir lo mismo, los ensayos optimizados contaminan más de principio a fin, además con mucha diferencia entre ambos para bajo régimen. Se observa también que hay mucha diferencia en los valores de HC para ensayos a 3.1 o 5.5, para el primer caso ronda un intervalo entre [1-5] y para el segundo caso [3-9], por lo que podemos sacar como conclusión que para combustiones a 3.1 pmi se producen menos HC

### 4.3.5 Humos

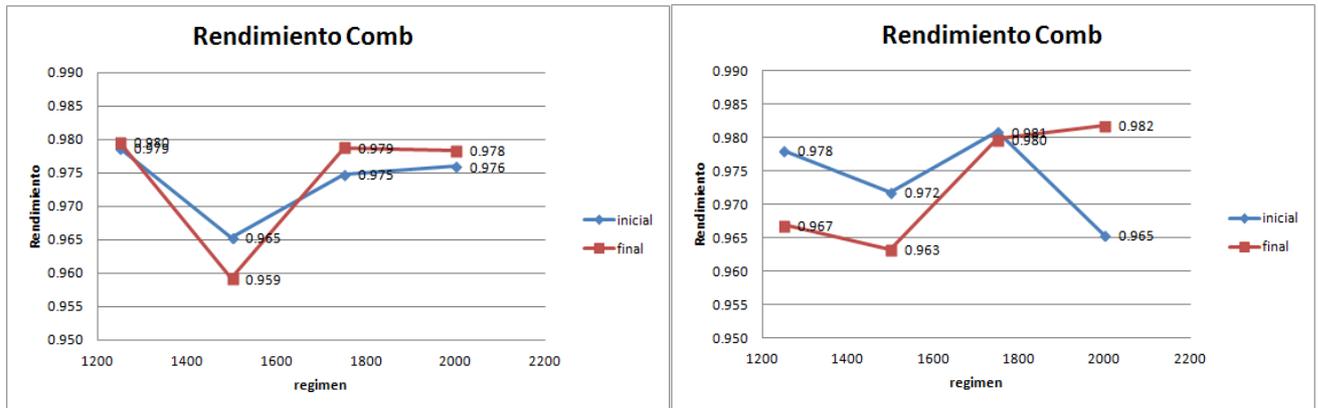


Gráficas 13 Humos

Para ensayos a 3.1 pmi es evidente sacar como conclusión que a mayor régimen menor son los humos producidos. Todo lo contrario que ha 5.5, que aun siendo mínimas las variaciones para estos ensayos, se observa que para los ensayos optimizados se incrementan los humos, .muy inferiores a los valores obtenidos para los ensayos iniciales a 5.5.

Por lo tanto, es razonable trabajar a 5.5 pmi o en caso de hacerlo a 3.1 que sea a alto régimen

### 4.3.6 Rendimiento de combustión



Graficas 14 rendimiento

Este parámetro nos indica la cantidad de combustible que se queda sin quemar, lo que produce ciertos contaminantes como CO y HC. Es fundamental reducir el combustible malgastado para aumentar el rendimiento global del motor y reducir los contaminantes.

En estas graficas se observa que a 3.1 pmi hay una disminución considerable del rendimiento, tanto como para los ensayos iniciales como para los optimizados, para 1500 r.p.m. y para el resto de regímenes mantiene valores constantes.

Para 5.5 bar se cruzan los ensayos a partir de 1750 r.p.m. donde los optimizados mejoran mucho su rendimiento y los ensayos iniciales lo empeoran según aumenta el régimen.

## 4.4 Análisis de los resultados.

### 4.4.1 Introducción.

Para poder analizar desde otro punto de vista las diferencias en la combustión entre los ensayos iniciales y los optimizados procedemos a estudiar mediante el programa calmec, gracias a este podemos graficar la liberación de calor y la presión media indica entre otras muchas variables de cada uno de los ensayos.

Esto nos permitirá visualizar las mejoras de cada optimización dentro del cilindro, lo que nos aporta gran información de hacia dónde estamos enfocando las mejoras. Ya que estas pueden tener 2 tendencias, por un lado puede que estas mejoras nos den como resultado una combustión mas plana que de lugar al apagado del motor o por otro lado que de una combustión mas explosiva la cual podría ser peligrosa para el cilindro del motor provocando el picado de biela (nock).

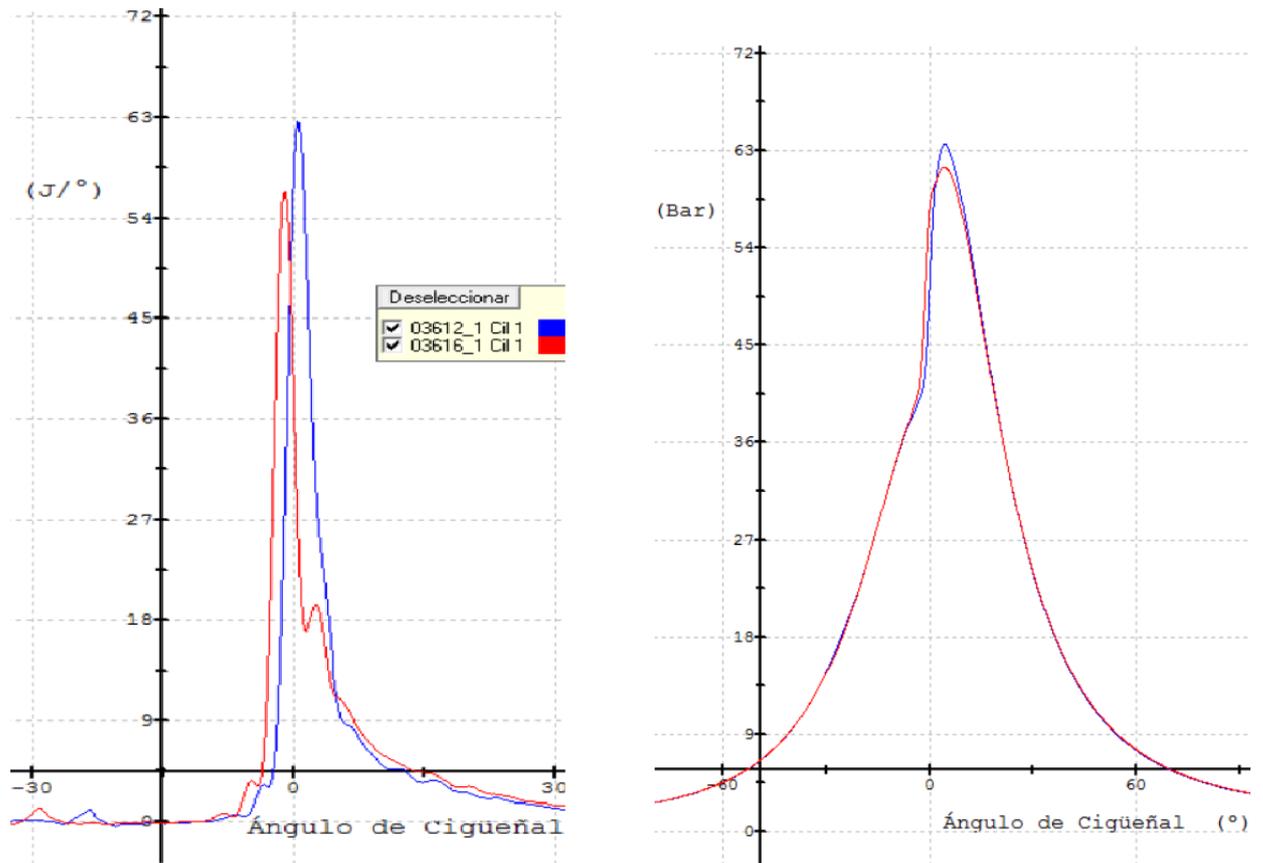
Para ello mostraremos en una misma grafica solapada la liberación de calor de 2 ensayos para un mismo punto de funcionamiento, uno será el inicial y el otro el optimizado. Del mismo modo para la presión media indicada del cilindro.

	inicial azul	final rojo		inicial azul	final rojo
	<b>3.1</b>	<b>3.1</b>		<b>5.5</b>	<b>5.5</b>
<b>1250</b>	03612_1	03616_1		03621_2	03618_1
<b>1500</b>	03596_5	03600_3		03628_3	03592_1
<b>1750</b>	03744_1	03748_3		03643_4	03725_1
<b>2000</b>	03789_3	03790_3		03776_3	03778_1

Representaremos los ensayos en azul aquellos que sean los iniciales sin realizar ninguna optimización en el motor y en rojo el mejor de los ensayos optimizados. Por lo tanto representaremos 8 casos para cada uno de los puntos de carga.

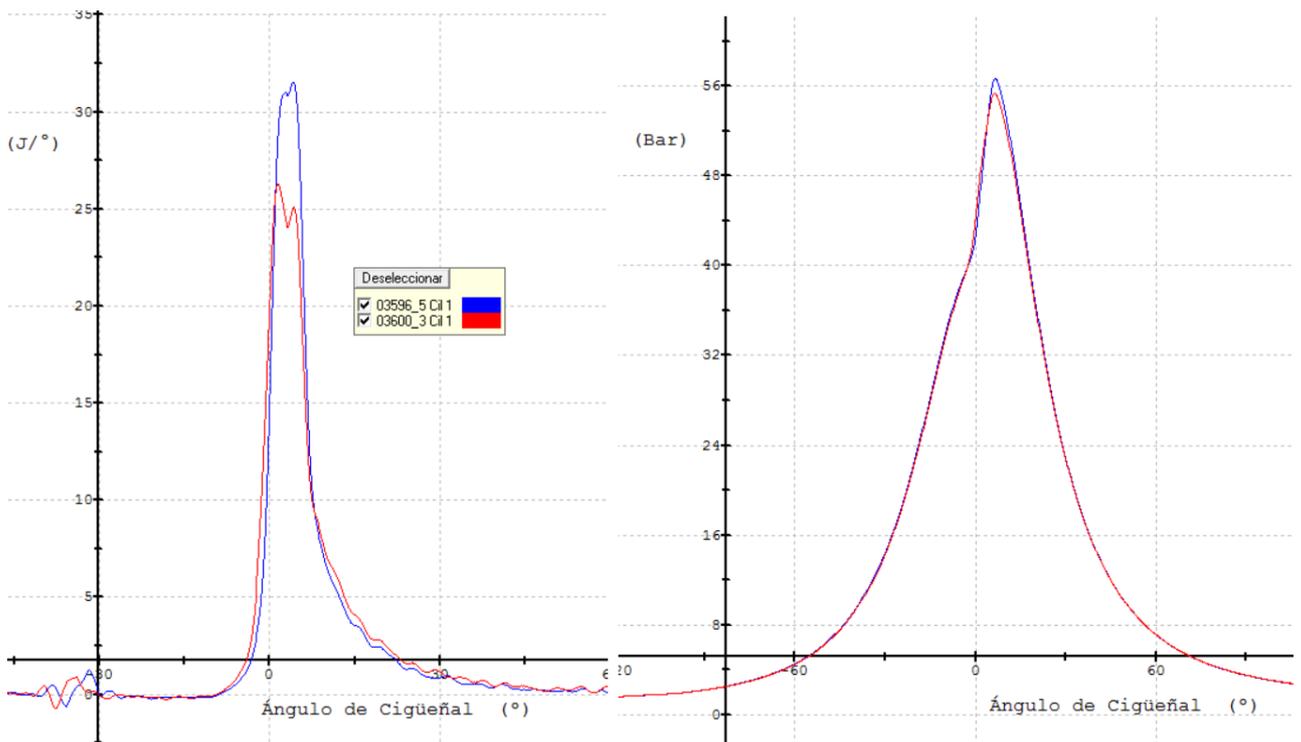
Podremos sacar conclusiones sobre la tendencia de nuestra optimización y como está afectando esta a la liberación de calor y la presión media indicada en el cilindro.

4.4.2 Gráficas a 1250-3.1 DFQL y presión.



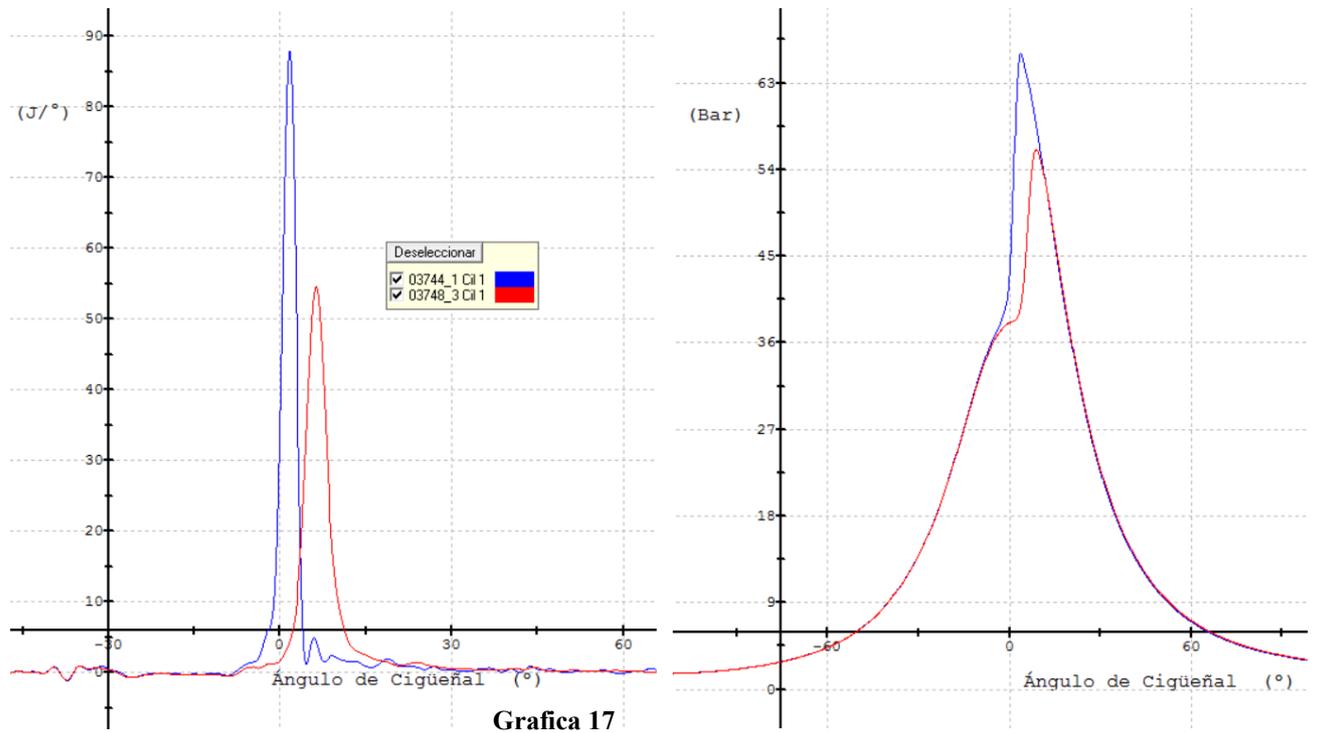
Grafica 15

4.4.3. Gráficas a 1500-3.1 DFQL y presión.

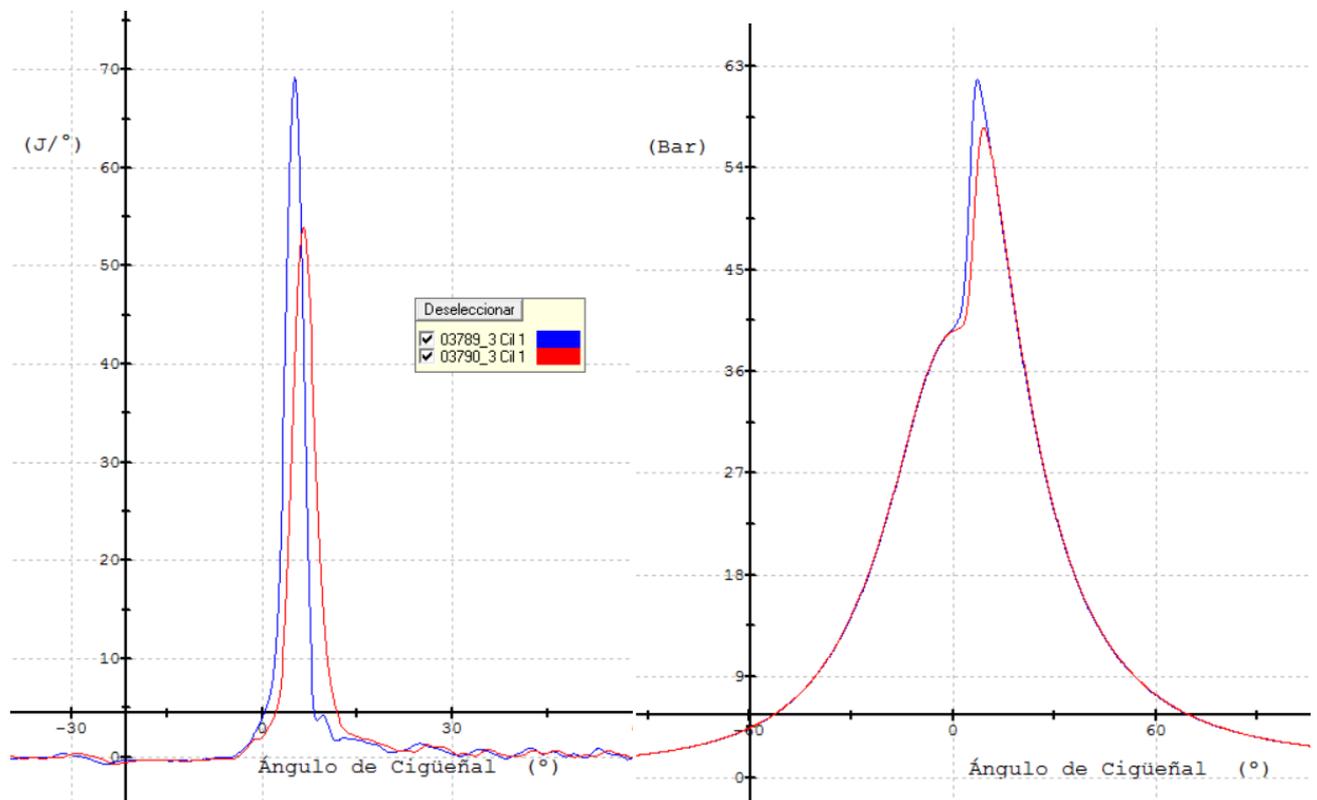


Grafica 16

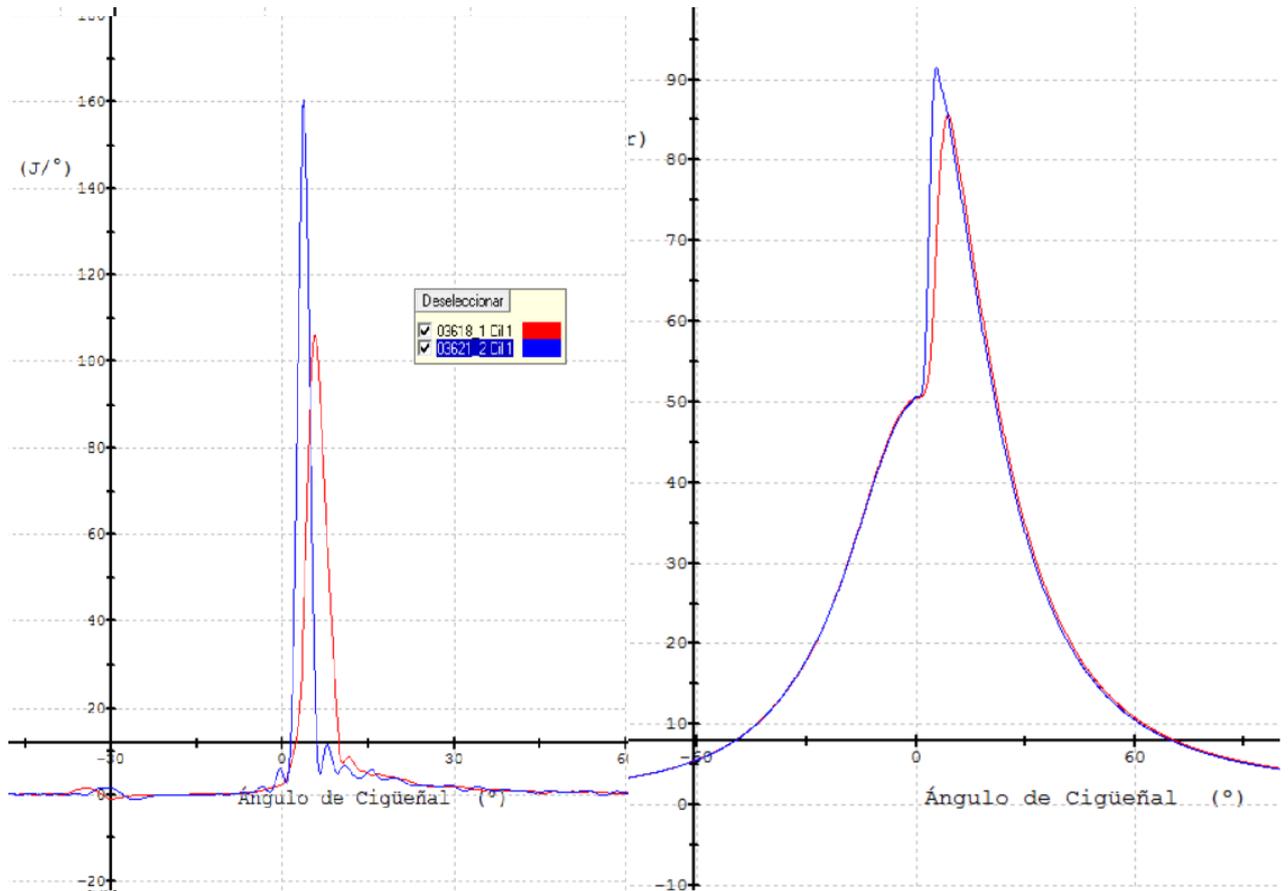
#### 4.4.4 Gráficas a 1750-3.1 DFQL y presión.



#### 4.4.5 Gráficas a 2000-3.1 DFQL y presión.

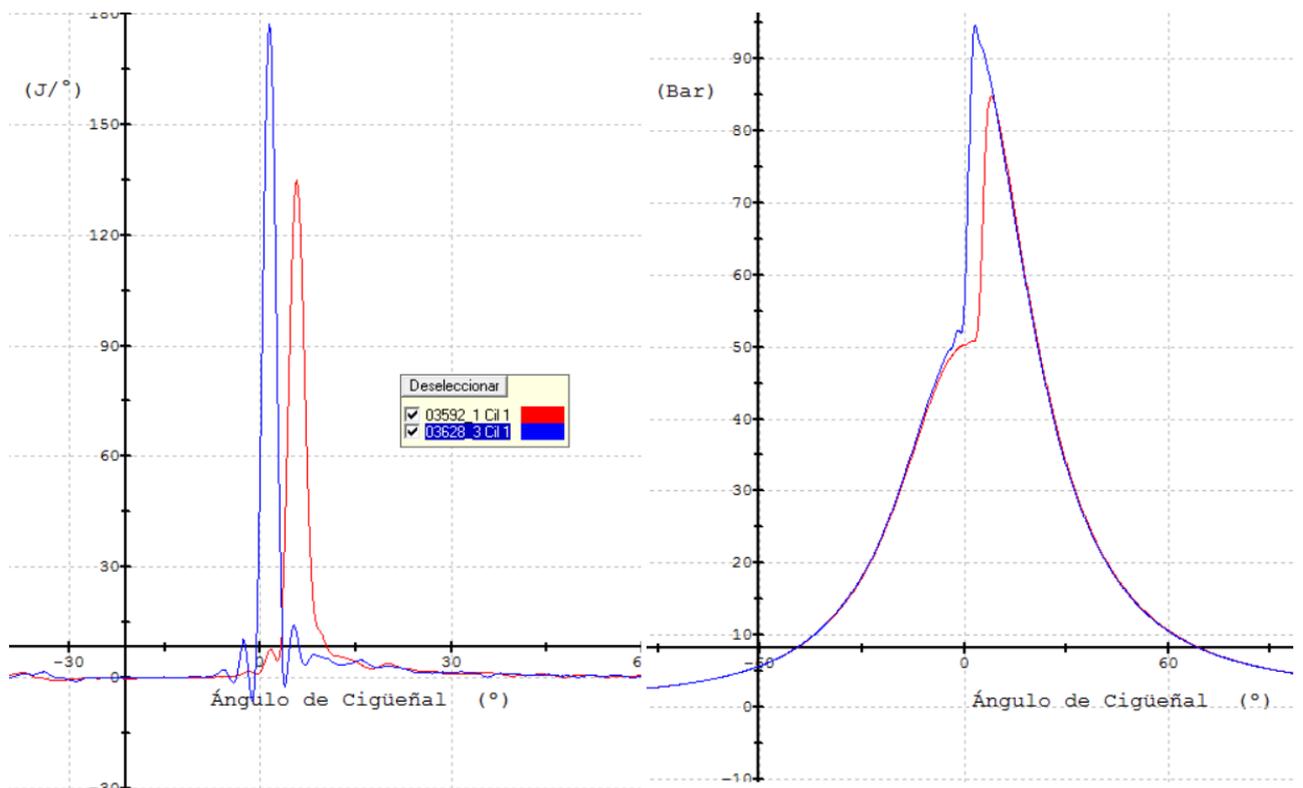


4.4.6 Gráficas a 1250-5.5 DFQL y presión.



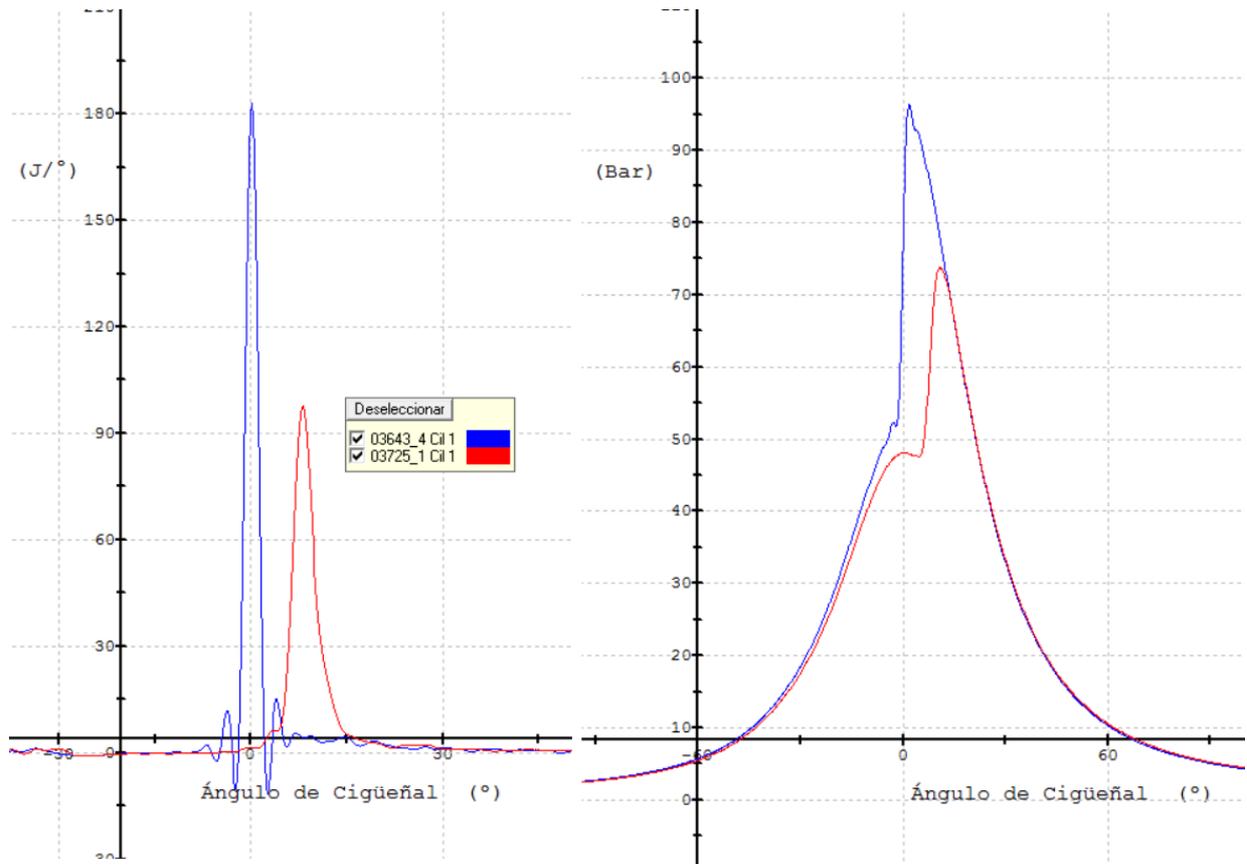
Grafica 19

4.4.8 Gráficas a 1500-5.5 DFQL y presión.



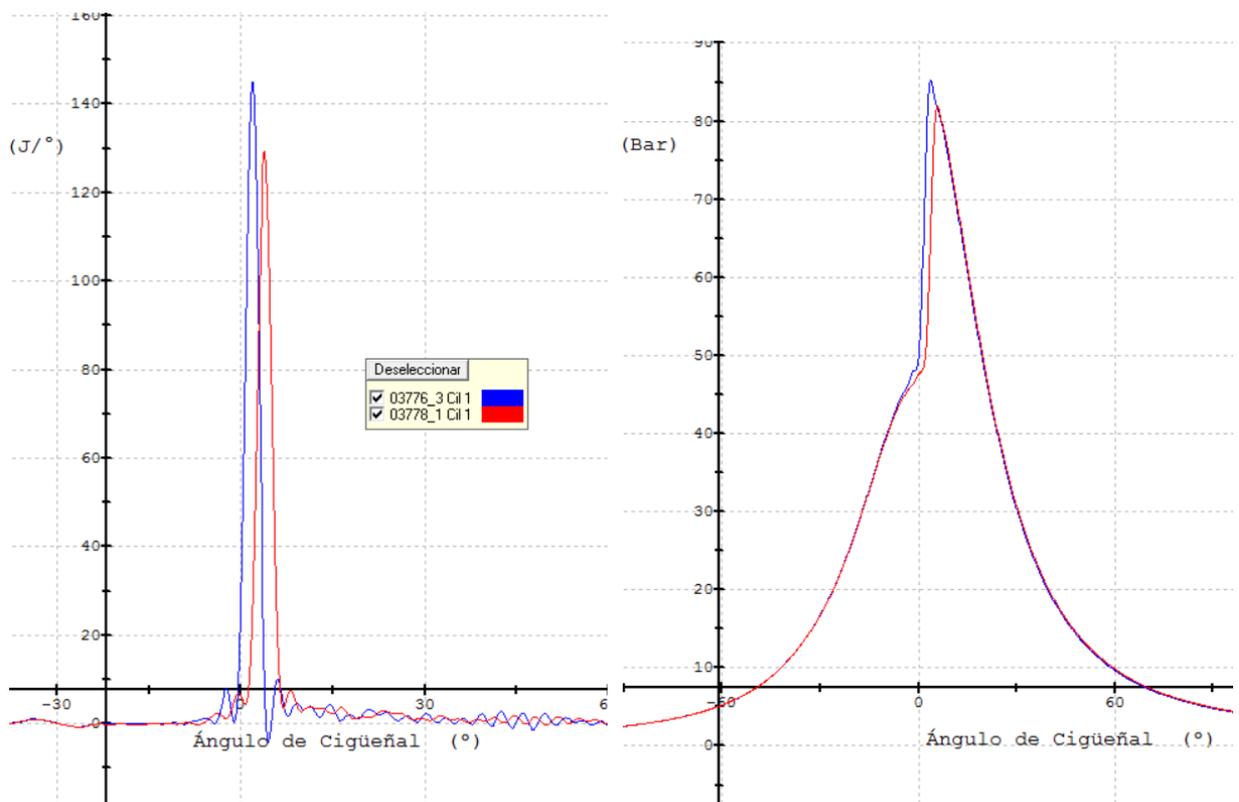
Grafica 20

4.4.9 Gráficas a 1750-5.5 DFQL y presión.



Grafica 21

4.4.10 Gráficas a 2000-5.5 DFQL y presión.



Grafica 22

#### 4.4.11 Conclusiones.

Como conclusiones generales se puede afirmar que la tendencia de la optimización consiste en retrasar la combustión, de este modo reducimos la temperatura de combustión induciendo una reducción a la vez de los NOX y los humos, este hecho es el más interesante. Ya que, estos 2 parámetros han tenido hasta el día de hoy una relación inversamente proporcional.

Al retrasar la combustión a su vez reducimos la liberación de calor y la presión en el cilindro, lo que nos reduce el riesgo de picado de biela.

Debemos de saber que si intentamos reducir demasiado la presión en el cilindro el motor se apagará por lo que debemos ser cuidadosos a la hora de reducir ya que nos encontraremos con una combustión más inestable y con el consecuente riesgo de que se nos apague el motor.

Gráficamente podemos observar como en casi todas las graficas de la izquierda, la que representa la liberación de calor en función del ángulo del cigüeñal, la curva en rojo está retrasada, es más ancha y más corta. Este tipo de combustión es menos lesiva para la biela evitando el picado.

Y en las graficas de la derecha las curvas en rojo tienen casi la misma forma que la inicial exceptuando la parte del máximo, dando algo menos de presión máxima. Debemos ser conscientes de que el objetivo fundamental es la reducción de los gases contaminantes y la reducción del consumo, y una de las consecuencias es la reducción de la presión aportada por el motor

Este nuevo sistema de combustión nos permite mejorar tanto humos, NOx y reducir el riesgo de picado de biela. Cuando hasta ahora la relación de los NOX y los humos era inversamente proporcional con este nuevo sistema somos capaces de reducir ambos a la vez.

Cabe destacar que ha sido posible mejorar en todos los puntos de operación tanto el consumo como las emisiones de NOx, aunque es necesario investigar más para controlar las emisiones de humos (soot), objetivo fundamental para futuras investigaciones.

Otro aspecto fundamental a resaltar de los ensayos es la mejora de los resultados cuando el proceso de combustión está ligeramente retrasado hacia la carrera de expansión y es modernamente rápida como se observa en las graficas de dFQI, ya que si la combustión se desplaza hacia el PMS y es rápida se produce picado de biela (knock) pero con contra si se retrasa demasiado se produce fallo de encendido (misfire).

Respecto al rendimiento de combustión se hace notorio que su valor está siempre por encima del 90%, por lo que se puede considerar que es suficientemente completa en todos los casos optimizados.

# **CAPÍTULO 5**

## **Conclusiones y trabajos futuros**

**Contenido:**

### **5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

**5.1 Introducción.**

**5.2 Conclusiones.**

**5.3 Trabajos futuros**

## 5.1 Introducción.

Como capítulo final del presente proyecto final de carrera y con el objetivo de cerrar el trabajo de investigación, en primer lugar se sintetizan las principales conclusiones obtenidas. El objetivo no es únicamente establecer, siempre que sea posible, relaciones entre dichas conclusiones, sino también contextualizarlas en el marco del estado actual del conocimiento tanto en el ámbito de la aplicación de sistemas de distribución variable a motores gasolina como en el del análisis del proceso de combustión PPC en este tipo de motores.

En una segunda etapa se proponen aquellas líneas de investigación que, a partir de las conclusiones principales previamente establecidas, resultan más prometedoras o generan mayores expectativas de éxito con la intención de promover la continuidad en el futuro del trabajo de investigación iniciado con el presente proyecto.

## 5.2 Conclusiones.

Por último, nos centraremos en realizar un breve resumen de todo el proyecto deteniéndonos en los puntos más importantes y de mayor interés para la obtención de las conclusiones finales.

Este resumen nos servirá para poder valorar en el cómputo global la investigación realizada para la obtención de los resultados y su posterior estudio.

Para comenzar debemos recalcar la intención de dicho proyecto, forma parte del estudio de un motor con un estructura de 2T para la casa Renault, la cual tiene pensado apostar por un vehículo híbrido en el futuro. A día de hoy, son muchos los que publican en los medios coches híbridos con resultados extraordinarios tanto para el medio ambiente como para la economía del propietario, sin ser totalmente cierto ya que o no publican todos los datos o los camuflan a su beneficio o comente errores de medida.

Para poder tener total claridad en este proyecto se ha necesita de unos medios y herramientas muy precisas, con el fin de no cometer ningún error en los cálculos y poder ser totalmente transparentes con los usuarios y con el medio ambiente.

Hay que recordar que el presente proyecto se basa en la implementación del concepto de combustión PPC con gasolina y comparación con el concepto CDC.

Como ya hemos explicado el combustible diesel produce demasiados gases contaminantes, por lo que se ha optado por utilizar gasolina de 95 octanos en un motor de tipo MEC, esto solo se puede lograr con un sistema de combustión muy característico e innovador. Este nuevo sistema de combustión parcialmente premezclado (PPC) es el que nos permite detonar la gasolina sin necesidad de provocar una chispa y sin tener que reproducir valores desorbitados de presión y temperatura. Los cuales darían lugar a un exceso de contaminantes, este sistema se basa en una doble o triple inyección del combustible para una solo combustión. Con el fin de poder conocer los límites y puntos óptimos de funcionamiento del motor hemos realizado un plan de ensayos paramétrico, siempre con la ayuda de un técnico para prevenir cualquier avería en el motor, y de esta manera poder crear un mapa de funcionamiento para el motor. Todos los datos se introducen a mano durante los ensayos y así tener un control total sobre cada parámetro del motor, ya que no podemos arriesgarnos a utilizar un mapa de otro motor.

Los ensayos se han realizado a lo largo de 2 años con el fin de poder realizar barridos de todos aquellos parámetros que se han considerado relevantes. Esta es una de las fases más críticas porque la más mínima desviación de los equipos de medida o en la introducción de los parámetros podría causar errores en la fase de obtención de conclusiones, echando por tierra todo el trabajo. Es por ello que en los proyectos de investigación hay que cuidar hasta el más mínimo detalle en cualquier fase si no queremos caer en conclusiones absurdas e irrelevantes.

Una vez definido el plan de ensayo y teniendo las herramientas necesarias podemos afirmar que hemos obtenido buenos resultados. Coherentes con nuestras estimaciones y dentro los límites.

Algunas de las conclusiones más relevantes de este estudio podrían ser:

- Hemos podido disminuir las emisiones de NO<sub>x</sub> y Hollín en las 2 condiciones estudiadas aquí (3.1 y 5.5 bar IMEP) en comparación con los CDC. La reducción de emisiones ha sido más evidente en los puntos de carga alta debido a la fase de combustión premezclada
- El uso de la estrategia PPC con gasolina permite la reducción de la presión de inyección y la admisión de un mayor volumen de EGR lo que da como resultado una disminución de hollín y NO<sub>x</sub> pero por contrapartida las emisiones de CO y HC aumentan en comparación con el antiguo sistema de combustión CDC, debido a que la triple inyección aumenta la cantidad de combustible adherido a las paredes del pistón lo que produce una peor oxidación.
- Para baja carga, 3.1 bar IMEP, no son tan relevantes las modificaciones en los parámetros de inyección, pero han sido notorias las modificaciones de renovación de carga. Por ejemplo en el ensayo a 1750-3.1 al aumentar el EGR retrasas la combustión, debido a que baja la concentración de oxígeno disminuyendo la reactividad de la combustión.
- Para media carga, 5.5 pmi, las modificaciones en los parámetros de inyección son mucho más significativas, adelantando la inyección del combustible, ya sea adelantando uno de los SOI o realizando un reparto de masas distinto entre SOI 1,2 y 3 produce un retraso de la combustión. Ya que al adelantarla la mezcla combustible-aire es más completa, como resultado da un dosado más pobre dan lugar a un retraso en el inicio de la combustión.
- En términos de eficiencia indicada en el rango de carga media-alta, el proceso de combustión es más rápido con temperaturas menores permitiendo la disminución de las pérdidas de calor durante la combustión.

La idea más importante es que la arquitectura de motor de dos tiempos y encendido por compresión es muy compatible con el concepto de combustión PPC utilizando gasolina como combustible por la gran flexibilidad que ofrece para controlar las condiciones de renovación de la carga y con ello las condiciones en las que se desarrolla el proceso de combustión.

Como inconvenientes cabe destacar que el diseño del motor produce demasiadas pérdidas de cortocircuito, al tener las válvulas de admisión y escape muy cerca, durante el proceso de renovación de carga. Dan lugar a un mayor consumo de combustible debido a que hay que el compresor debe trabajar más, además de aumentar la cantidad de residuos que se quedan en el cilindro de una combustión a otra, disminuyendo todas ellas el rendimiento final del motor. Por lo que sabemos que todavía queda mucho rango de mejora

Se está preparando un nuevo diseño de la geometría de la boquilla del inyector y del pistón para mejorar su compatibilidad con el concepto de gasolina PPC para permitir incluso más mejoras. Un trabajo de optimización detallada utilizando una metodología de diseño de experimentos (DoE) puede ser útil no sólo para entender los efectos acoplados que influyen en la formación de la combustión y las emisiones, sino también para encontrar el mejor esquema de inyección que puede cumplir simultáneamente los futuros requisitos y restricciones en términos de emisiones y consumo cuando se opera en el concepto PPC.

Por último, no existe el motor perfecto, pero podemos afirmar que este motor proporciona muchas expectativas de futuro.

### 5.3 Trabajos futuros

Tras terminar el presente proyecto de investigación han surgido ciertos aspectos sobre los que son difíciles profundizar, por lo que deben ser abordados en investigaciones posteriores. Además tras evaluar los logros conseguidos surgen nuevas metas no planteadas anteriormente donde se puede mejorar. La visión general de los resultados obtenidos nos permite mirar hacia el futuro y proponer nuevos objetivos sobre los que investigar para la mejora de nuestro proyecto.

Se ha demostrado la importancia de las múltiples inyecciones de combustible. Variando los tiempos de inyección y la distribución de la masa de combustible en las distintas inyecciones podríamos proponer una implementación de varios inyectores:

- Uno en el conducto de admisión para mejorar la homogeneidad de la mezcla y evitar enviar el combustible a las paredes el cual produce HC
- Otro inyector en la culata para ofrecer los puntos de SoE2 y SoE3.

Otra vía de trabajo podría ser la implementación de un nuevo sistema de emisiones que ayudará a saber con precisión el tamaño de las partículas de hollín y así mejorar los puntos de funcionamiento para disminuir la creación de partículas que no sean capaces de retener los FAPs.

La casa Renault tiene ya en mente el próximo proyecto el cual incluye el concepto PPC, donde se quiere mejorar el rendimiento del barrido y renovación de carga. Para ello, se ha diseñado una nueva estructura del motor denominada estructura uniflujo donde el colector de admisión está situado en medio del cilindro, y cuando se introduzca aire fresco este empuje a los residuos de la combustión anterior hacia las válvulas de escape, y además evitar el enorme gasto que suponía el cortocircuito que causaba tener las válvulas una al lado de la otra.

Dicho proyecto también se llevara a cabo en las instalaciones del CMT, dado los buenos resultados de los últimos proyectos que la casa Renault ha encargado a este departamento.

Con el fin de poder avanzar en el mundo de la automoción con vehículos que consuman menos y contaminen menos al medio ambiente, objetivo fundamental para todos a corto plazo.





## 6. BIBLIOGRAFÍA

1. Francisco Payri Gonzales, Jose.M Desantes. "Motores de Combustión Interna Alternativos" Reverté; ISBN:9788429148022.
2. Kitamura, Y., Mohammadi, A., Ishiyama, T., and Shioji, M., "Fundamental Investigation of NOx Formation in Diesel Combustión Under Supercharged and EGR Conditions," SAE Technical Paper 2005-01-0364, 2005, doi: [10.4271/2005-01-0364](https://doi.org/10.4271/2005-01-0364)
3. Tribotte, P., Ravet, F., Dugue, V., Obernesser, P., *et al.*, "Two Strokes Diesel Engine - Promising Solution to Reduce CO2 Emissions." *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 48:2295-2314, 2012, doi: [10.1016/j.sbspro.2012.06.1202](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.1202).
4. Benajes, J., Novella, R., De Lima, D., Tribotte, P., *et al.*, "Analysis of the combustion process, pollutant emissions and efficiency of an innovative 2-stroke HSDI engine designed for automotive applications." *Appl. Therm. Eng.* 58:181-193, 2013, doi: [10.1016/j.applthermaleng.2013.03.050](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.03.050).
5. Benajes, J., Novella, R., De Lima, D., and Tribotté, P., "Analysis of combustion concepts in a newly designed 2-stroke HSDI compression ignition engine." *Int. J. Engine Res.* (Special Issue Article):1-16, 2014, doi: [10.1177/1468087414562867](https://doi.org/10.1177/1468087414562867).
6. Payri, R., García, J.M., Salvador, F., and Gimeno, J., "Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics." *Fuel* 84(5):551-561, 2005, doi: [10.1016/j.fuel.2004.10.009](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.009).
7. Kalghatgi, G.T., Risberg, P., and Ångström, H., "Advantages of Fuels with High Resistance to Auto-ignition in Late-injection, Low-temperature, Compression Ignition Combustion," SAE Technical Paper 2006-01-3385, 2006, doi: [10.4271/2006-01-3385](https://doi.org/10.4271/2006-01-3385).
8. Sellnau, M., Sinnamon, J., Hoyer, K., and Husted, H., "Gasoline Direct Injection Compression Ignition (GDCI) - Diesel-like Efficiency with Low CO2 Emissions," SAE Technical Paper 2011-01-1386, 2011, doi: [10.4271/2011-01-1386](https://doi.org/10.4271/2011-01-1386).
9. Sellnau, M.C., Sinnamon, J., Hoyer, K., and Husted, H., "Full-Time Gasoline Direct-Injection Compression Ignition (GDCI) for High Efficiency and Low NOx and PM." *SAE Int. J. Engines* 5(2), 2012, doi: [10.4271/2012-01-0384](https://doi.org/10.4271/2012-01-0384).
10. Sellnau, M.C., Sinnamon, J., Hoyer, K., Kim, J., *et al.*, "Part-Load Operation of Gasoline Direct-Injection Compression Ignition (GDCI) Engine," SAE Technical Paper 2013-01-0272, 2013, doi: [10.4271/2013-01-0272](https://doi.org/10.4271/2013-01-0272).
11. Austen, A.E.W., and Priede, T., "Origins of Diesel engine noise," Proc. IMechE Symp. on Engine Noise and Noise Suppression pp 19–32, 1958, doi.



## Definitions/Abbreviations

<b>aTDC</b>	After Top DeadCentre - Después del punto muerto superior
<b>(A/F)<sub>St</sub></b>	Stoichiometric air/fuel ratio -
<b>CA10,CA50, CA90</b>	Crank angle for 10%, 50% and 90% of fuel burnt
<b>CAD</b>	Crankangle degree
<b>CDC</b>	Conventional diesel combustion
<b>CI</b>	Compression ignition
<b>CoVP<sub>max</sub></b>	Coefficient of variation of maximum cylinder pressure
<b>CoV IMEP</b>	Coefficient of variation of indicated mean effective pressure
<b>CR</b>	Compression ratio
<b>DOHC</b>	Double overhead camshaft
<b>ΔP</b>	Pressure difference between intake and exhaust ports
<b>EGR</b>	Exhaust Gas Recirculation
<b>EVC</b>	Exhaust Valve Closing (angle)
<b>EVO</b>	Exhaust Valve Opening (angle)
<b>HCCI</b>	Homogeneous Charge Compression Ignition
<b>HSDI</b>	High Speed Direct Injection
<b>IGR</b>	Internal Gas Recirculation
<b>IMEP</b>	Indicated Mean Effective Pressure
<b>IVC</b>	Intake Valve Closing (angle)
<b>IVO</b>	Intake Valve Opening (angle)
<b>ISFC</b>	Indicated specific fuel consumption
<b>ISFC<sub>corr</sub></b>	Corrected indicated specific fuel consumption
<b>LHV</b>	Lower heating value
<b>MON</b>	Motor Octane Number
<b>Olap</b>	Overlap
<b>P<sub>int</sub></b>	Intake pressure
<b>dP/damax</b>	Maximum pressure gradient
<b>PPC</b>	Partially Premixed Combustion

<b>PPCI</b>	Partially Premixed Compression Ignition
<b>Prail</b>	Injection rail pressure
$\phi$	In-cylinder equivalence ratio
$\phi_{\text{eff}}$	In-cylinder effective equivalence ratio
<b>RoHR</b>	Rate of Heat Release
<b>RON</b>	Research Octane Number
<b>SoC</b>	Start of combustion
<b>SoE</b>	Start of energizing (injector signal)
<b>SoI</b>	Start of injection
<b>TDC</b>	Top Dead Centre
<b>TIVC</b>	Mean gas temperature at intake valve closing
<b>VVA</b>	Variable Valve Actuation
<b>VVT(1,2)</b>	Variable Valve Timing (intake, exhaust)
<b>YO<sub>2</sub>,IVC</b>	Oxygen concentration at the intake valve closing angle
$\eta_{\text{combustion}}$	Combustion efficiency
$\eta_{\text{indicated}}$	Indicated efficiency





UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

**TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

# **Estudio energético de un motor de encendido por compresión y arquitectura 2-tiempos operando con el concepto de combustión parcialmente premezclada**

## **PRESUPUESTO**

AUTOR: Antonio Alcázar López

TUTOR: Ricardo Novella Rosa

**Curso Académico: 2015-16**



# INDICE GENERAL

1. COSTES.....	4
1.1 Introducción.....	5
1.2. Costes de investigación.....	6
1.2.1 Coste de mano de obra.....	6
1.2.2 Coste amortización equipos y sistemas auxiliares.....	7
1.2.3 Coste material fungible.....	8
1.2.4 Presupuesto total.....	9





# CAPÍTULO 1

## Costes

### Contenido:

## 1. COSTES

### 1.1 Introducción

### 1.2 Costes de investigación

1.2.1 Coste de mano de obra

1.2.2 Coste amortización equipos y sistemas auxiliares

1.2.3 Coste material fungible

1.2.4 Presupuesto total.

## 1.1 Introducción.

A continuación se expone el coste de ejecución del proyecto. Podemos diferenciar 2 partes, la primera donde analizaremos los diseños de experimentos, realización de los planes de ensayo y su correspondiente análisis, y por otro lado los ensayos propiamente dichos

Para la realización del presupuesto se han tenido en cuenta los materiales utilizados, los equipos de la sala de ensayo, así como sus herramientas especializadas y la mano de obra cualificada para cada momento.

Hay que destacar que para la realización del proyecto todos los materiales necesarios han sido aportados por el CMT, ya que se llevan a cabo muchos proyectos de la misma índole y se necesita de un almacén de piezas de repuesto de un coste elevado y complicado de evaluar. Por lo tanto el presupuesto ha sido basado en las piezas fundamentales y mano de obra sobre todo.

En el presupuesto se han tenido en cuenta tres grupos de costes diferentes:

- a) **Mano de obra directa.** Todo el personal necesario para llevar a cabo el proyecto, se valorara en Euro/hora dependiendo de su cargo de responsabilidad dentro de proyecto:
  - Ingeniero industrial "II" (realización de ensayos, análisis y tratamiento de datos).
  - Ingeniero técnico industrial "ITI" (montaje y desmontaje, mantenimiento, apoyo durante la realización de ensayos).
  - Operario de laboratorio.
  
- b) **Amortización de los equipos utilizados.** Según la normativa de la unión europea se considera un periodo entorno a los 10 años para todos los equipos y sistemas. El cual se considera lineal independientemente de la carga de trabajo que reciban
  
- c) **Material fungible.** En este coste se han incluido los materiales que se han consumido o han sido desechados por deterioro. Por ejemplo todo tipo de sensores, filtros, agua, electricidad, etc...

## 1.2. Costes de investigación.

### 1.2.1 Coste de mano de obra.

Ref	descripción	unidad	Cantidad	precio(€/Ud)	coste Parcial(€)
1.2.1.1	Ingeniero Industrial	Horas	300	25	7500 €
1.2.1.2	Ingeniero Técnico	Horas	350	19,63	6.870,5 €
1.2.1.3	Operario de laboratorio	Horas	250	14,78	3695 €
<b>Coste amortización de los equipos y sistemas auxiliares</b>					<b>18.065,5 €</b>

Tabla 1

### 1.2.2 Coste amortización equipos y sistemas auxiliares.

Ref	descripción	unidad	Cantidad	precio(€/Ud)	coste Parcial(€)
1.2.2.1	Sistema de admisión	Horas	217	8,17	1.772,89 €
1.2.2.2	Sistema de escape	Horas	217	0,34	73,78 €
1.2.2.3	Sistema de refrigeración y lubricación	Horas	217	0,84	182,28 €
1.2.2.4	Sistema de combustible	Horas	217	0,98	212,66 €
1.2.2.5	Horiba MEXA 7100 DEGR y sonda NO2	Horas	217	10,55	2289,35 €
1.2.2.6	Medidor de humos AVL 415	Horas	217	1,21	262,57 €
1.2.2.7	Blow-by AVL 442	Horas	217	0,80	173,6 €
1.2.2.8	Codificador angular AVL 364	Horas	217	0,39	84,63€
1.2.2.9	Torquímetro	Horas	217	3,22	698,74 €
1.2.2.10	Freno dinamométrico AMK	Horas	217	8,77	1903,9 €
1.2.2.11	Pinza amperimétrica	Horas	217	0,06	13,02 €
1.2.2.12	Sistema de adquisición de datos AVL PUMA	Horas	217	13,37	2901,29 €
1.2.2.13	Cadenas de medidas Yokogawa y osciloscopio	Horas	217	0,89	193,13€
1.2.2.14	Acondicionar de combustible	Horas	217	1,66	360,22 €
1.2.2.15	Licencias de software	Horas	217	3,60	360,22 €
<b>Coste amortización de los equipos y sistemas auxiliares</b>					<b>11.902,45 €</b>

Tabla 2

### 1.2.3 Coste material fungible.

Ref	descripción	unidad	Cantidad	precio(€/Ud)	coste Parcial(€)
1.2.3.1	Gasolina específica para ensayos	Litros	80	8,25	660 €
1.2.3.2	Filtros de combustible y aceite	Unidad	3	0,36	1,08 €
1.2.3.3	Filtros medidor de contaminantes	Unidad	10	0,89	8,9 €
1.2.3.4	Energía eléctrica	KWh	2500	0,52	1300 €
1.2.3.5	Aceite	Litros	20	0,53	10,60 €
1.2.3.6	Transductor de presión PMA P40	Unidad	1	13,05	13,05 €
1.2.3.7	Termopares tipo K y termoresistencias Pt100	Unidad	1	1,55	1,55 €
1.2.3.8	Sensor de presión PMI	Unidad	1	0,85	0,85 €
1.2.3.9	Sensor de presión Admisión	Unidad	1	0,47	0,47€
1.2.3.10	Sensor de presión Escape	Unidad	1	3,15	3,15€
1.2.3.11	Sensor de Presión raíl	Unidad	1	8,57	8,57 €
1.2.3.12	Sensor de presión en cámara	Unidad	3	0,06	0,18€
<b>Coste amortización de los equipos y sistemas auxiliares</b>					<b>2.008,4€</b>

Tabla 3

### 1.2.4 Presupuesto total.

Descripción	Coste Parcial (€)
Mano de obra	18.065,5 €
Amortización de los equipos y sistemas auxiliares	11.902,45 €
Material fungible	2.008,4 €
<b>Presupuesto total</b>	<b>31.976,35 €</b>

Tabla 4



