



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

**ESTUDIO PARAMÉTRICO EXPERIMENTAL,
PARA LA DETERMINACIÓN DE LA
TEMPERATURA ÓPTIMA DE ACTIVACIÓN
DEL SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE LOS
GASES EN UN MOTOR DIÉSEL EURO 6 DE
AUTOMOCIÓN**

AUTOR: FERNANDO REDONDO PUELLES

TUTOR: Dr. JOSÉ MANUEL LUJÁN MARTÍNEZ

Curso Académico: 2015-16

ÍNDICE

DOCUMENTO I: MEMORIA

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN	6
1.2 HISTORIA DEL MCIA.	7
1.3 CONTAMINACIÓN DE LOS MCIA	8
1.4 OBJETO DEL PROYECTO	13
1.5 VIABILIDAD	13
1.6 DESARROLLO DEL PROYECTO	14
1.7 COMPOSICIÓN DEL TRABAJO	14
1.8 JUSTIFICACIÓN	15

CAPÍTULO 2: INSTALACIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN	17
2.2 SITUACIÓN	17
2.3 SALA DE ENSAYOS	17
2.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA BANCADA.	18
2.3.2 SISTEMA DE FRENO.	18
2.3.3 TRANSMISIÓN	18
2.3.4 SISTEMA ELÉCTRICO	19
2.3.5 SISTEMA DE VENTILACIÓN.	19
2.3.6 SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN	19
2.3.7 SISTEMAS DE SEGURIDAD	20

CAPÍTULO 3: MOTOR OBJETO DE ESTUDIO

3.1	INTRODUCCIÓN	22
3.2	MOTOR RENAULT R9M	22
3.3	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	24
3.4	SISTEMA DE INYECCIÓN	24
3.5	SISTEMA DE SOBREALIMENTACIÓN	26
3.6	SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	27
3.7	SISTEMA DE LUBRICACIÓN	28

CAPÍTULO 4: SISTEMA EGR

4.1	INTRODUCCIÓN	30
4.2	SISTEMA EGR	30
4.3	MECANISMO DE FORMACIÓN DE NO _x	33
4.4	FORMACIÓN DE PARTÍCULAS	35
4.5	FORMACIÓN DE CONDENSADOS	35

CAPÍTULO 5: SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

5.1	INTRODUCCIÓN	37
5.2	ECU	37
5.3	SISTEMA DE MEDIDAS	38

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

6.1	INTRODUCCIÓN	44
6.2	ESTRATEGIA BASADA EN LA RECIRCULACIÓN DE GASES (EGR)	44
6.2.1	ENSAYO CON 30% DE APERTURA DE VÁLVULA DE EGR HP Y NO SWIRL	46
6.2.2	ENSAYO CON 30% DE APERTURA DE VÁLVULA DE EGR HP CON SWIRL	51

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

6.2.3 ENSAYO CON 50% DE APERTURA DE VÁLVULA DE EGR HP CON SWIRL	53
6.2.4 ENSAYO CON 35% DE APERTURA DE VÁLVULA DE EGR HP Y NO SWIRL.	56
6.3 CONCLUSIONES.	59
BIBLIOGRAFIA	62

DOCUMENTO II: PLIEGO DE CONDICIONES

CAPÍTULO 1: CONDICIONES GENERALES

1. INTRODUCCIÓN	65
2. CONDICIONES A CUMPLIR POR LA SALA	65
3. CONDICIONES A CUMPLIR EN LA INSTALACIÓN	65
4. NORMATIVA PARA LOS OPERADORES	66

DOCUMENTO III: PRESUPUESTO

CAPÍTULO 1: PRESUPUESTO

1. INTRODUCCIÓN	69
2. SALARIO DE LOS TRABAJADORES	69
3. COSTE DE LOS EQUIPOS	69
4. COSTE DE MATERIALES Y RECURSOS ENERGÉTICOS	70
5. PRESUPUESTO	70

DOCUMENTO I:

MEMORIA

Realizado por: Fernando Redondo Puelles

Dirigido por: Dr. José Manuel Luján Martínez

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

A pesar de la posible agotamiento de los combustibles fósiles, de la contaminación que produce su combustión, y del problema medioambiental que esta causa, a pesar de los avances y la inversión en energías renovables, este tipo de combustibles, son los que más aportan en cuanto a consumo de energía global en el mundo, como es posible ver en el siguiente grafico.

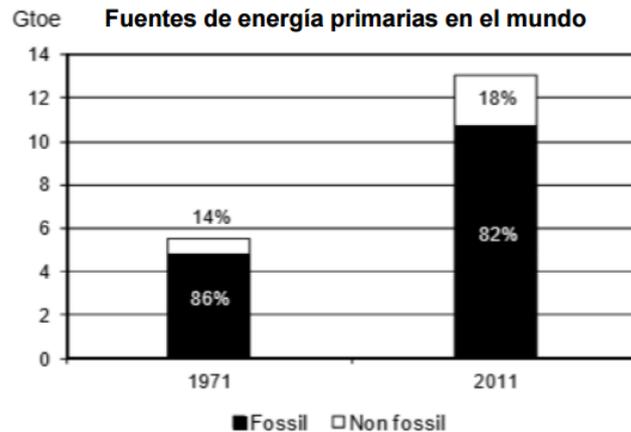


Figura 1.1: Fuentes de energía

Una de sus usos más importantes que se le da a estos combustibles es en el motor de combustión interna alternativa, que se utiliza en números ámbitos, siendo el más importante el destinado a la automoción.

Además de su relativa fácil obtención y un precio no demasiado elevado, su importancia y gran utilidad de los combustibles fósiles en esta aplicación reside principalmente en su gran valor de densidad energética, con un valor de 35.86MJ/l en el caso del gasoil y de 34.78MJ/l.

Lo que otorga una gran autonomía y potencia en un vehículo traccionado por un motor con estos combustibles, en contraposición nuevas tecnologías como motores eléctricos tienen una menor autonomía, o motores que utilizan por combustible el hidrogeno, que su densidad energética en lo que a masa se refiere es muy alta, pero al tratarse de un gas, un litro de hidrógeno a condiciones atmosféricas daría una energía muy inferior a la de un combustible fósil.

Lo que sí es cierto es que con el avance en diversas tecnologías con el transcurso de los años se han ido fabricando cada vez motores mas ecológicos y eficientes, reduciendo las emisiones por vehículo considerablemente, pero al aumentar el parque automovilístico global, estas emisiones no se han reducido sino que han sufrido un aumento progresivo año tras año.

1.2 HISTORIA DEL MCIA

El objetivo principal del nacimiento de los primeros motores consistía en la mecanización del vehículo sustituyendo la fuerza animal, al principio se crearon múltiples conceptos de motor, aplicando la experiencia de otros campos: máquina de vapor, motor eléctrico, etc.

El desarrollo de los primeros motores estuvo muy condicionado por el tipo de combustible disponible: gas, carbón, pólvora, aceite, etc.

Pero no es hasta finales del siglo XIX, cuando aparece el motor de combustión interna alternativa, concretamente, en 1876 de la mano de Nicolaus Otto nace el motor de encendido provocado de cuatro tiempos, que utilizaba como combustible gas, unos años después, y años más tarde, en 1892 Rudolf Diesel patenta su concepto de motor de encendido por compresión que utilizaba como combustible aceite de cacahuete.

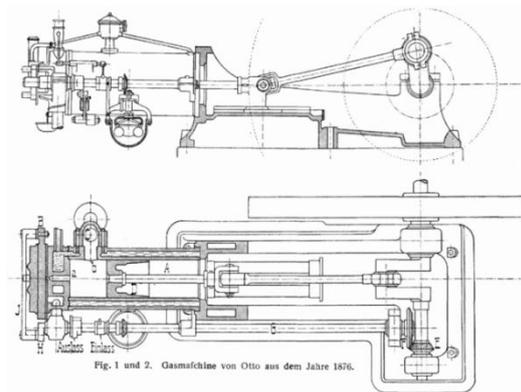


Figura 1.2: Motor Nicolaus Otto

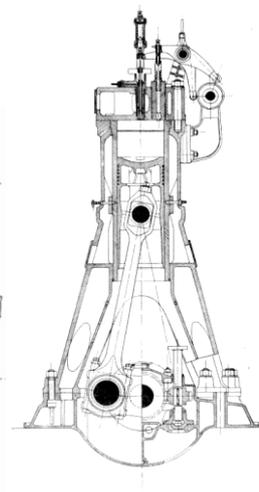


Figura 1.3: Motor de Rudolf Diesel

Los motores de combustión interna alternativa, se han ido encontrando con numerosos problemas a lo largo de su historia, que fueron solventando gracias a la aportación de diversas soluciones tecnológicas.

Algunas fechas que cabe reseñar en la historia del motor de combustión interna alternativa en cuanto a avances tecnológicos son las siguientes:

- 1905: Alfred Büchi patenta un motor turbo-sobrealimentado.
- 1925: Jonas Hesselman presenta el primer motor de gasolina con inyección directa.
- 1933: Citroën Rosalie, primer turismo con motor diésel .
- 1936: Mercedes lanza el 260D, el primer coche diésel de fabricación en serie.
- 1952: Bosch fabrica los primeros sistemas de inyección directa de gasolina para aplicación en serie en vehículos.
- 1967: Bosch saca al mercado el primer sistema de inyección electrónica el DJetronic.
- 1978: Mercedes produce el primer turismo turboalimentado, el 300 SD.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

- 1983: Sistema de inyección electrónico con sonda lambda para el control del dosado. Catalizador de tres vías.
- 1989: El grupo Volkswagen presenta un motor diésel de inyección directa turboalimentado para aplicación en automóviles (motor TDI).

Con los avances tecnológicos producidos, cada motor se especializa en una determinada aplicación y sufren grandes avances tanto el motor de encendido provocado como el de compresión, hasta llegar a los motores de combustión alternativa que se conocen hoy en día, dichos avances se han dado mas en los motores diésel, que en sus primeros años en lo que a la industria del automovil se refiere, estaban en un segundo plano, sin embargo la mayoría de vehículos del mercado actual, instalan motores de encendido por compresión.

Los últimos avances tecnológicos, y a donde mayor parte de investigación se destina, estan relacionados con la emisión de contaminantes, como se vera a continuación.

1.3 CONTAMINACIÓN DE LOS MCIA

En los últimos años del siglo XX, , el hombre empieza a dislumbrar los efectos creados después del gran descubrimiento de los combustible de origen fósil, combustible que se caracteriza por poseer un gran poder calorífico, y una alta densidad energética , pero la población mundial, se dio cuenta que estos combustibles eran una navaja de doble filo, ya que afectaban contaminando los ecosistemas, afectando a su fauna y flora, y también el clima, ademas de serios problemas de salud a la población que se encontraba expuesta a tal contaminación.

El llamado efecto invernadero, es uno de los mayores problemas que produce la contaminación, este consiste en subida paulatina de la temperatura de la atmósfera, que se produce como resultado de la concentración en la atmósfera de gases, principalmente dióxido de carbono, que es la principal sustancia resultante de la combustión de combustibles fósiles.

Pero no es a partir de la ultima decada del siglo XX, concretamente en el año 1992 cuando aparece la primera norma que regula la emisión de contaminantes, concretamente la EURO I, a posteriori irian apareciendo nuevas normas con el transcurso de los años, siendo cada cual más exigente con el control de emisiones.

La norma europea sobre emisiones es un conjunto de requisitos que regulan los límites para emisiones de gases de combustión de los vehículos de la Unión Europea. Las normas se definen a partir de una serie de directivas de la Unión Europea.

Las normas Euro controlan las emisiones de los siguientes compuestos como se puede ver en la siguiente tabla:

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

	valido a partir de:	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	HC+Nox (g/km)	PM
EURO I	ene-92	2,72	-	-	0,97	0,14
EURO II	ene-96	1	0,15	0,55	0,7	0,08
EURO III	ene-00	0,64	0,06	0,5	0,56	0,05
EURO IV	ene-05	0,5	0,05	0,25	0,3	0,025
EURO V	sep-09	0,5	0,05	0,18	0,23	0,005
EURO VI	ago-14	0,5	0,09	0,08	0,17	0,005

Tabla 1.1-Normas EURO

Estos compuestos son:

- CO, monóxido de carbono.
- HC, hidrocarburos sin quemar.
- NO_x, resulta de la suma de dióxido de carbono y monóxido de carbono.
- PM, partículas.

Como se puede comprobar, la emisión de dióxido de carbono, CO₂, no se encuentra regulada por dicha normativa, sino que se controla mediante la emisión media de una flota de vehículos, en la que numerosos fabricantes realizan "trampas", construyendo vehículos de bajo consumo para poder fabricar vehículos con altas prestaciones. El límite viene regulado por la siguiente fórmula, en caso de no cumplimiento se aplicaran las sanciones consecuentes.

$$\text{Límite} \left(\frac{\text{g}}{\text{km}} \right) = 130 + 0.0457 * (m - 1372) \quad (1.1)$$

Donde m es la masa del vehículo.

El cumplimiento o no de las normativa EURO, anteriormente se determinaba mediante el control del funcionamiento del motor en ciclo NEDC(New European Driving Cycle). Pero en la próxima norma el ensayo cambia y se llevara a cabo aplicando al coche las condiciones de funcionamiento del nuevo ciclo Europeo que se presenta a continuación.

El nuevo ciclo Europeo de homologación (WLTC), el cual intenta simular una conducción real, este consiste en cuatro ciclos low, medium, high y extra-high, llegando en este ultimo a una velocidad máxima de 130km/h, y con una duración total de aproximadamente 30 minutos.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

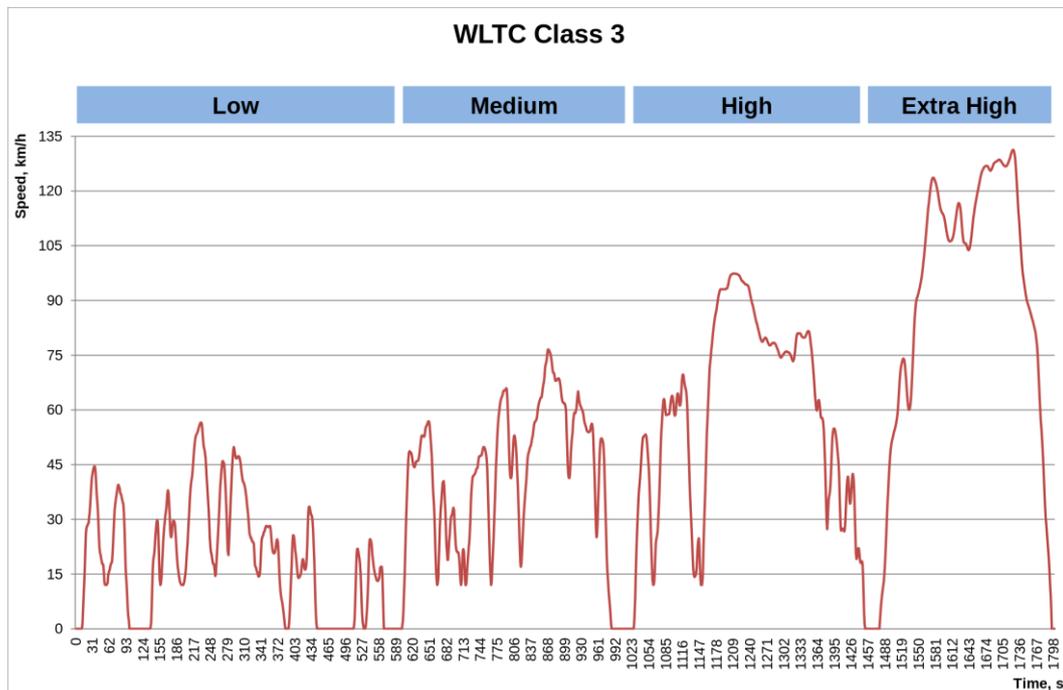


Figura 1.4: Ciclo Europeo WLTC

Esta prueba siempre se ha llevado a cabo en condiciones ambientales (20°C aproximadamente), exceptuando la última Euro VI-B que al parecer en un futuro se llevara a cabo en condiciones de temperatura por debajo de los 0°C, concretamente a unos -7°C.

Para poder llegar a cumplir estos límites de contaminantes, cada vez más restrictivos se han tenido que llevar a cabo diferentes medidas de control de estos, existiendo soluciones activas que evitan la formación de estos y soluciones pasivas o de post-tratamiento que consiste en eliminar o evitar la emisión a la atmósfera las sustancias producidas.

En el presente documento para los pertinentes ensayos se utilizara un motor de encendido por compresión por lo que es importante conocer el tipo de combustión de estos y sus principales emisiones contaminantes tras esta.

Estos motores queman el combustible mediante una deflagración por difusión (por lo que existe un frente de llama), la inyección y la combustión se realizan simultáneamente.

Los productos obtenidos serán los siguientes:

- $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, al realizar una combustión ideal.
- $\text{CO} + \text{HC}$, al realizar una combustión incompleta.
- NO_x , como producto del Nitrógeno existentes en el aire.
- Partículas, por deshidrogenación del combustible (hollín), o por adsorción de aceite.
- Óxidos de azufre, por un combustible de mala calidad.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

A continuación es posible ver como varia la composición de los gases de escape en función del dosado.

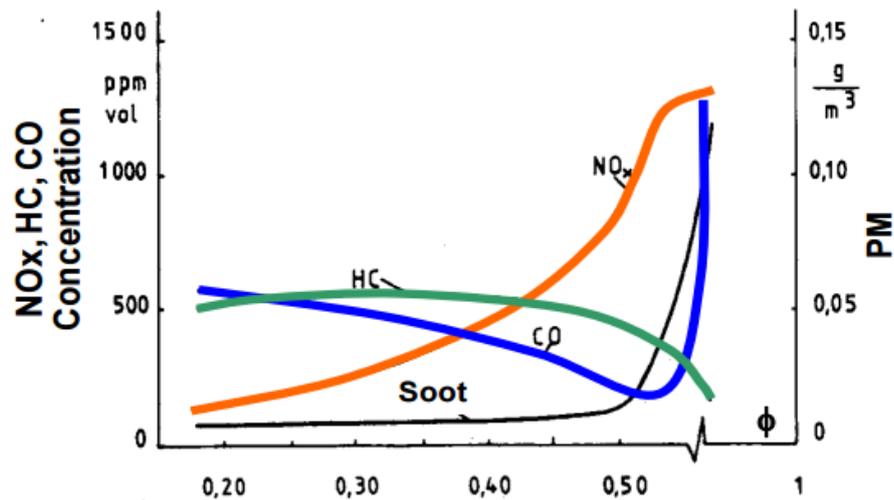


Figura 1.5: Generación contaminantes

Los principales problemas que tienen los diésel al someterse al control de contaminantes son la emisión de partículas y la de NO_x , como era comentado anteriormente existen dos tipos de soluciones, activas y pasivas, las activas impiden la formación de contaminantes mientras las pasivas se dedican a la neutralización de estos, para que no sean expulsados a la atmósfera.

Las activas engloban las acciones que podrían realizarse sobre el sistema de inyección, aumentando la presión de este, reducción de diámetro de los orificios de inyección, post-inyecciones, y el sistema EGR (Exhaust Gas Recirculation) que consiste en la recirculación de los gases de escape, para bajar la temperatura en la cámara de combustión y así reducir la formación de NO_x .

Las estrategias que engloban modificar la inyección, son varias, entre las que destacan, disminuir el tamaño de los orificios y aumento de la presión, con esto consigue la reducción del dosado al lift-off y como consecuencia una menor producción de partículas.

La longitud de lift-off (LOL) se define como la distancia entre el inyector y el inicio de la zona de reacción. Su estudio tiene mucha importancia para concretar de la zona donde el combustible y aire se encuentran separados sin que se presente aun las condiciones de mezcla para la reacción, debido a la gran velocidad de salida del chorro. Esta velocidad está relacionada con el diámetro del orificio y con la presión del sistema de inyección, llegando actualmente a unas presiones de hasta 2000 bares.

Otra estrategia que todavía no se encuentra muy sustentada debido a su dificultad de control y regulación sería la de realizar una combustión generalizada premezclada, en la que la inyección se

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

adelanta, y se controla el inicio de la combustión mediante EGR, este tipo de combustión se caracteriza por la ausencia de partículas en los gases de escape debido a que no existe llama por difusión y a muy bajos NO_x por la baja temperatura.

En lo que recirculación de gases se refiere, actualmente existen dos sistemas EGR el de alta presión en el que los gases de escape pasan directamente del colector de escape a la admisión y el de baja presión, este sistema de baja presión permite que los gases de escape pasen previamente por la turbina, para después pasar por el filtro de partículas, y que la mezcla de los gases de admisión con los del escape pueda producirse antes del compresor, sin dañar la rueda de este, lo que se traduce en mejora del sistema de turbosobrealimentación el cual se veía perjudicado con el sistema de alta presión.

El principal problema del sistema EGR a parte de realizar una peor combustión, traducida en una pérdida de par y potencia, es la de mayor formación de partículas, y aquí es donde reside la gran importancia de incorporar un filtro de partículas.

Otra posible solución alternativa a realizar EGR sería una solución pasiva que consiste en trampas de NO_x (LNT) que sus principales inconvenientes son los de no muy alta eficiencia, coste elevado del Platino y del Rodio como elementos oxidantes y reductores y un aumento del consumo como consecuencia de regeneración de la trampa.

Y por último el sistema mediante reducción catalítica selectiva(SCR), que necesita la presencia de un aditivo, NH_3 (amoníaco) que se genera a partir de urea (AdBlue), este sistema con muy alta eficiencia ha sido muy común en motores de camiones y se ha empezado a utilizar en algunos vehículos a partir de 2014, con bajo EGR.

Debido a la cada vez mayor presión de normativas de regulación de emisiones, algo que ha sido comentado anteriormente, siendo más restrictivas las normas EURO con el paso de los años, en la actualidad, las multinacionales destinadas al mercado del automóvil, destinan gran parte de su presupuesto a la investigación de diversos sistemas para controlar las emisiones a la atmosfera, aunque no solo por esto, sino como estrategia de marketing, ya que cada vez existe una mayor concienciación social, en lo que a contaminación atmosférica se refiere, por lo que conseguir fabricar un coche más "ecológico", podría resultar más atractivo para el cliente.

1.4 OBJETO DEL PROYECTO

La finalidad del proyecto consiste en determinar experimentalmente, los instantes y los grados de recirculación funcionando a baja temperatura, en torno a los -7°C , los ensayos asemejaran la primera parte del ciclo Europeo(WLTC), que corresponde a un ciclo urbano, así que presentara unas condiciones de baja carga y bajo régimen.

El principal conveniente en este ensayo es la generación de NO_x que tienen los motores diésel a baja temperatura, por lo que para bajar la emisión de estos, se recurrirá a la recirculación de gases.

- Esta estrategia consistirá en la modificación de la cartografía del motor para conseguir la activación del sistema de recirculación de gases(EGR), nada más arrancar este, ya que en condiciones normales, la ECU está programada para que no realice EGR hasta llegar a una temperatura determinada.

Esta estrategia está destinada a reducir la temperatura en la cámara de combustión lo que produce que la producción de NO_x se aminore, no obstante el motor pasara a realizar un peor ciclo con menores presiones medias efectivas.

Las presión media efectiva(pme) es la presión constante que durante una carrera produce un trabajo igual al trabajo efectivo, dicho en otras palabras es un parámetro característico de cada motor e informa cuanto bueno es el ciclo de este.

Durante los ensayos, se tendrá como meta reducir por tres la producción de óxidos de nitrógeno, mediante el sistema EGR, y no perjudicar excesivamente las prestaciones del motor, y la no excesiva emisión de hidrocarburos o monóxido de carbono.

El motor con el que se llevara a cabo el estudio es un motor Renault R9M, de 1.6 litros de cilindrada que genera una potencia y par máximos de 96Kw(130cv) y 320Nm respectivamente.

1.5 VIABILIDAD

Para la realización del presente estudio han sido necesarios los siguientes elementos, y sin alguno de ellos habría resultado de total inviabilidad.

- En primer lugar, tener una viabilidad económica, el proyecto ha sido financiada por la empresa multinacional Valeo, como resultado de un contrato de colaboración entre la Universidad Politécnica de Valencia, Valeo y Renault.

Esto es posible gracias a que el departamento de motores térmicos es un referente en lo que a investigación se refiere dentro de la UPV y España.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

- En segundo lugar será necesaria mano de obra cualificada, personal del departamento del CMT Motores Térmicos de la UPV compuesto por profesores, técnicos, y personal de laboratorio.
- Y por último es indispensable disponer de los medios técnicos necesarios para la realización de los diferentes ensayos, que también se encuentra garantizado por el departamento del CMT, que dispone de diferentes salas y equipos para poder llevar a cabo satisfactoriamente el estudio. Es sustancial el hecho de disponer de una sala climatizada, en la que se pueda conseguir la temperatura deseada para los ensayos.

1.6 DESARROLLO DEL PROYECTO

El desarrollo del proyecto constará de diferentes fases:

- El primer paso a dar será el de poner el motor a punto, y revisar los diferentes niveles, de aceite, refrigerante y de batería, así como asegurarse de la perfecta instalación de los múltiples sensores.
- A continuación para poder realizar los ensayos es indispensable tener la sala a la temperatura deseada, por lo que será necesario encender el sistema de climatización horas antes de la realización del ensayo.
- La siguiente fase consistirá en la realización de estos ensayos, durante la realización de estos, se debe controlar diferentes parámetros que servirán de objeto de estudio a continuación.
- Y por último se procederá a el estudio y análisis de los diferentes ensayos, así como las conclusiones obtenidas que se detallaran en este trabajo final de grado.

1.7 COMPOSICIÓN DEL TRABAJO

El presente trabajo final de grado contendrá los siguientes documentos:

1. Memoria descriptiva, dividida en los siguientes capítulos:

- Primer capítulo: Se realizará una pequeña introducción del proyecto a realizar así como el objetivo y desarrollo de este.
- Segundo capítulo: Consistirá en una breve descripción de los sistemas y elementos de los que está dotada la sala de ensayos, para garantizar la realización de estos con una total precisión de forma segura y practica.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

- Tercer capítulo: En este capítulo se procederá a detallar el motor con el que se han realizado los ensayos, así como de todos sus sistemas de interés y vital importancia para su correcto funcionamiento.
- Cuarto capítulo: Exposición de los diferentes sistemas EGR.
- Quinto capítulo: Se realizará una descripción de los diversos sistemas de adquisición de datos, así como de las variables obtenidas.
- Sexto capítulo: Estudio y análisis de los resultados obtenidos.

2. Pliego de condiciones:

En este documento, se enumeraran las diferentes condiciones que se deben de cumplir para la correcta realización del proyecto, ya sea la explicación del funcionamiento de la instalación, como las condiciones referidas tanto a seguridad como a higiene.

3. Presupuesto:

En el presupuesto se llevará a cabo una descripción de los diferentes recursos utilizados para poder llevar a cabo el trabajo, así como el coste detallado de cada uno de ellos, llegando a un presupuesto final.

1.8 JUSTIFICACIÓN

El motivo por el que se realiza el presente trabajo, en primer lugar es por el interés que tienen fabricantes de automóviles y fabricantes de elementos de estos, en este caso Renault y Valeo, por conocer diferentes métodos para reducir las emisiones de diferentes sustancias producidas en la combustión del motor, y así lograr obtener el certificado de que se encuentran por debajo del límite de emisiones marcado por la norma Euro VI.

Y en segundo lugar para certificar que se han alcanzado los conocimientos necesarios para la obtención del Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales, y a su vez el de aumentar el conocimiento en motores térmicos y del funcionamiento actual de los sistemas de control de emisiones en los motores de combustión interna alternativa destinados a automóviles.

CAPÍTULO 2:

INSTALACIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

El motor con el que ha realizado el estudio está situado en una sala de ensayo del departamento de motores térmicos de la UPV, dicha sala se encuentra equipada con diferentes sistemas de medida y con los que controlar diferentes parámetros del motor para poder trabajar en diferentes puntos de funcionamiento de este.

Para poder realizar todas las medidas y todos los cambios necesarios, la sala deberá tener un alto grado de automatización y de control electrónico.

2.2 SITUACIÓN

La sala donde se realizan los ensayos es una de las celdas que el departamento de Maquinas y Motores Térmicos tiene instalada anexa al edificio 6D, del Campus De Vera en la Universidad Politécnica de Valencia.



Figura 2.1: Plano Campus de Vera

2.3 SALA DE ENSAYOS

La sala donde se llevan a cabo los diferentes ensayos deberá estar equipada, y deberá cumplir una serie de requisitos de tal forma que permita la realización de estos de forma totalmente segura y eficaz.

En primer lugar, deberá tener el espacio necesario para albergar el motor con el que se ha realizado el estudio, y de todos los elementos y sistemas auxiliares que permiten la realización de este.

Alrededor del motor deberá existir la amplitud necesaria, para permitir a los técnicos realizar posibles reparaciones y pertinentes revisiones de este.

Un elemento indispensable y particular de la celda es la existencia y las buenas prestaciones del sistema de climatización, y que la sala donde este el motor este perfectamente aislada para reducir pérdidas y poder alcanzar la temperatura deseada.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

La celda debe estar provista de un sistema de extracción de humos para los gases de escape, que previamente habrán sido analizados por el sistema y método pertinente.

Unos de los requisitos más importantes deberán ser los requisitos relacionados con la seguridad de la sala, por lo que deberá disponer de un sistema de detección de incendios, otro sistema de detección de gases tóxicos que adviertan de tales para poder realizar la evacuación del personal que se encuentre en la sala.

Otra imposición será la existencia de una ventana, que permita visualizar el motor desde la mesa de trabajo durante los diferentes ensayos.

2.3.1 DESCRIPCIÓN DE LA BANCADA

La bancada es el elemento encargado de la sustentación del motor, esta tiene como funciones, asegurar una perfecta y segura sujeción de este, así como absorber la vibración producida por el motor mediante unos muelles, previamente instalados en esta.

2.3.2 SISTEMA DE FRENO

Para simular las condiciones de grado de carga y régimen deseados, será preciso conectar el motor, con un freno, este dispositivo electromagnético se encuentra conectado al cigüeñal del motor, en la parte donde en un vehículo llevaría acoplado el embrague y la caja de cambios

Mediante la electrónica pertinente, y desde el ordenador del puesto de control, será posible definir cuál es la resistencia a aplicar por parte del freno, esta consistirá en asemejar un grado de carga y régimen correspondiente a la primera parte del ciclo Europeo, el cual simula una conducción de tipo urbana.

2.3.3 TRANSMISIÓN

La transmisión tiene como función principal transmitir el giro desde el cigüeñal al freno, y realizarla de una manera segura y eficaz.

Esta se encuentra sometida a gran variedad de esfuerzos y a un alto número de revoluciones, por lo que debe ser elegida teniendo en cuenta que pueden transmitirse vibraciones u oscilaciones desde el motor al freno y dañar este o viceversa.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

2.3.4 SISTEMA ELÉCTRICO

La sala de ensayo se encuentra equipada con una instalación eléctrica dotada por una red trifásica de corriente alterna de 380v. Esta instalación se encuentra controlada por un cuadro de interruptores diferenciales e interruptores magneto-térmicos para garantizar la seguridad de los elementos y personal que se encuentren en la sala.

2.3.5 SISTEMA DE VENTILACIÓN

El habitáculo donde se realizaran los ensayos, está dotado de un sistema de extracción de gases, este sistema es de los de mayor importancia, y tendrá como misión.

- Eliminar los excesos de gases de escape, y de gases producidos por evaporación del combustible.
- Garantizar una temperatura ambiente adecuada que resulte de confort para los usuarios de la sala.
- Mantener una temperatura aceptable, para que no se sobrecalienten los diferentes dispositivos y máquinas

2.3.6 SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN

La celda de ensayo utilizada, tiene la particularidad respecto las demás salas de las que dispone el CMT motores térmicos, de que se encuentra totalmente climatizada, y es capaz de alcanzar la temperatura deseada dentro de unos límites.

Esto resulta indispensable para la realización de los ensayos a baja temperatura. Se necesita que se llegue a un valor de -7°C , para ello se dispone de:

- Un sistema de climatización industrial de 18 Kw.
- Un total aislamiento de la sala, para evitar pérdidas y poder alcanzar dicha temperatura sin problemas, y sin un exceso de gasto de energía.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

2.3.7 SISTEMAS DE SEGURIDAD

La sala se encuentra equipada con distintos sistemas para garantizar la seguridad del personal, como de los equipos e instalaciones, para ello consta de un sistema contra incendios, y un sistema de detección y eliminación de gases nocivos, al superar los niveles de CO se activa una serie de alarmas en el ordenador y una señal acústica.

La sala también dispone de extintores, especialmente diseñados para extinguir fuegos de origen eléctrico, ya que la sala dispone de elementos y dispositivos alimentados por grandes intensidades como el freno que funciona con una corriente de 310A.

Por otra parte la instalación eléctrica de la sala cumple la normativa vigente del código técnico de baja tensión.

CAPÍTULO 3:

MOTOR OBJETO DE ESTUDIO

3.1 INTRODUCCIÓN

En primer lugar se realizará una breve introducción sobre en qué consiste un motor de combustión alternativa.

Una primera definición podría ser la de referirse a estos motores como maquinas térmicas, en los que los gases resultantes de un proceso de combustión empujan un embolo o pistón, desplazándolo en un cilindro, que correctamente acoplado a un cigüeñal mediante el sistema viela-manivela, permitirá transformar este movimiento alternativo en un movimiento de rotación.

En la actualidad existen numerosas clases de motores de combustión alternativa, pudiéndose clasificarse según los siguientes modos:

- Según el ciclo de trabajo:
 - Motores de dos tiempos que realizan el ciclo de trabajo en una carrera del cigüeñal.
 - Motores de cuatro tiempos que necesitan de dos carreras.
- Según la forma de encendido del combustible:
 - MEP: Motores de encendido provocado.
 - MEC: Motores de encendido por compresión.
- Según la presión de admisión:
 - Motores atmosféricos.
 - Motores sobrealimentados.
- Según el sistema de refrigeración:
 - Refrigeración por aire.
 - Refrigeración mediante un líquido refrigerante.

El motor que se utilizará, en cada una de las anteriores clasificaciones se definiría como un motor de cuatro tiempos, con encendido por compresión, sobrealimentado, y con la refrigeración mediante líquido refrigerante.

3.2 MOTOR RENAULT R9M

El motor con el que se han realizado los diferentes ensayos, se trata de un motor estándar, que se puede encontrar en el mercado, por ejemplo en un Renault Scenic.

Este motor ha sido cedido por parte de la multinacional del automóvil Renault, a la Universidad Politécnica de Valencia y concretamente al departamento de motores térmicos, gracias al convenio que existe entre ambas partes para la investigación y la elaboración de distintos ensayos.

Sus principales características se encuentran recogidas en la siguiente tabla:

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

	Renault R9M
Combustible	Diésel
Aspiración	Sobrealimentado
Cilindrada(cm3)	1598
nº de cilindros	4 en línea
Cilindrada unitaria(cm3)	399,5
Diámetro(mm)	80
Carrera(mm)	79,5
S/D	0,99375
Relación de compresión	15,4:1
Par máximo(Nm)	320
nº rev- par_max	1750
Potencia max(kw)	96
nº rev-pot_max	4000

Tabla 3.1: Renault R9M

Observando la tabla anterior, concretamente la relación de compresión, bastante alta, se puede cerciorar que se trata de un motor diésel, otro valor de interés y bastante particular de este motor, es el de la relación carrera diámetro (S/D), ya que los motores diésel suelen ser ligeramente alargados y en este caso se trata de un motor ligeramente supercuadrado.

Otra serie de características del motor son las siguientes:

- 16 válvulas accionadas por un doble árbol de levas en cabeza(DOHC).
- La sobrealimentación se lleva a cabo por un turbo-compresor de geometría variable, con intercooler refrigerado por liquido refrigerante antes de la admisión, este intercooler no es el que lleva equipado el motor de serie, sino que ha sido instalado por los técnicos, con el propósito de tener un mejor rendimiento.
- Sistema de recirculación de escape(EGR), dicho motor cuenta con un sistema complejo en el que puede realizar EGR de alta y de baja presión indistintamente.
- Sistema de inyección common-rail con una presión máxima de 1600 bares.

3.3 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

Este motor Renault, tiene la particularidad de estar dotado de un sistema de "swirl variable" este sistema opera a través de una válvula de turbulencia situada en el colector de admisión, por lo que tiene la opción de introducir el aire en la cámara de combustión mediante dos formas, por un lado introducirlo con una corriente de carácter normal, y la otra opción será la de introducirlo mediante una corriente tipo "swirl".

La corriente tipo "swirl" consiste en introducir el aire mediante una especie de torbellino, la cual mejora la mezcla del aire con el combustible produciéndose una mejor y más eficiente combustión.

Dicho sistema se puede contemplar en la siguiente imagen.

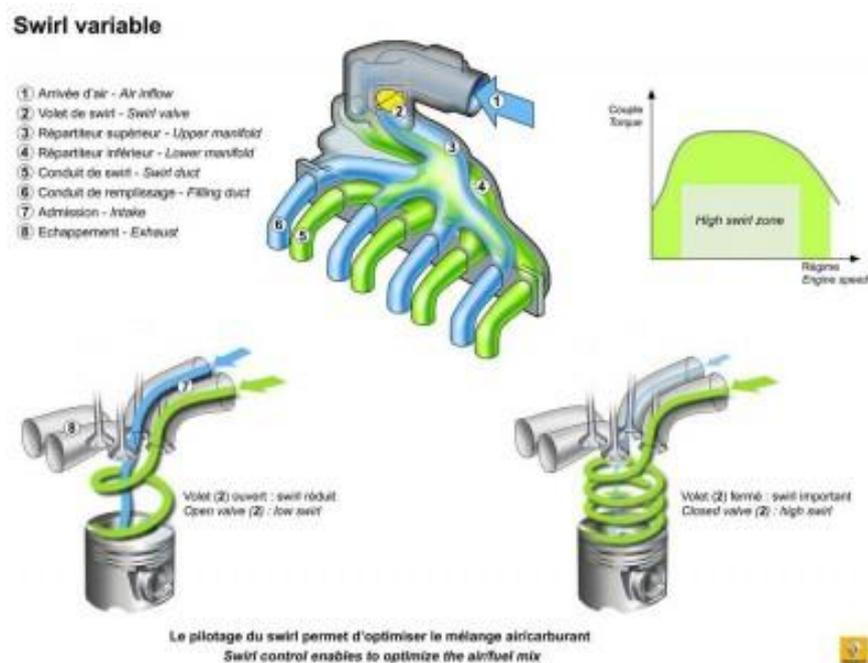


Figura 3.1: Sistema swirl

3.4 SISTEMA DE INYECCIÓN

Los motores diésel tienen como particularidad, que realizan una combustión por difusión, lo que quiere decir que se quema combustible al mismo tiempo que se introduce en la cámara, la inyección se realiza cerca del punto muerto superior, por lo que se debe realizar una inyección a alta presión, para favorecer la atomización, mezcla y evaporación. El momento exacto de la carrera en el que se realiza la inyección, se encuentra gobernado por la unidad de control del automóvil, que se encarga de controlar los inyectores electrónicos.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

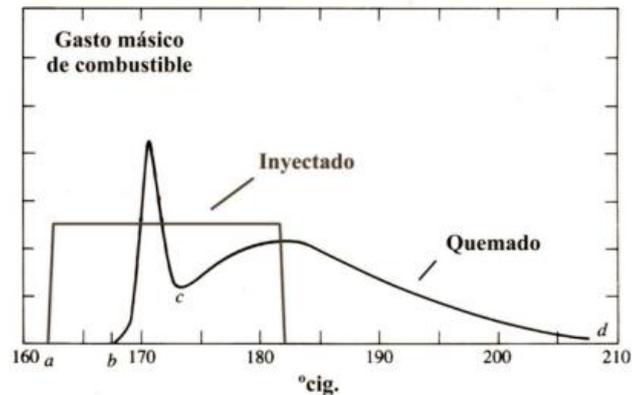


Figura 3.2 : Inyección diésel

En prácticamente todos los motores diésel actuales, la inyección realizada se caracteriza por ser directa, lo que conlleva que el inyector está dentro de la cámara de combustión, existiendo también la posibilidad de realizar una inyección indirecta pero con mayor funcionalidad en motores MEP.

La combustión en los MEC, se caracteriza en que la cámara de combustión se encuentra dentro del cilindro, existiendo una gran influencia y relación entre la forma del "bowl" y el inyector.

El "bowl" es la forma de la cámara de combustión, que en los motores MEC se encuentra labrada en el pistón.

Para el sistema de inyección, como la mayoría de motores diésel a día de hoy, dispondrá de un sistema common-rail pudiendo alcanzar una presión máxima de 1600 bares, y pudiendo realizar varias inyecciones en cada ciclo.

Este sistema es indispensable para los motores actuales, y más para un motor como en el que se realizará el presente trabajo en el que se aplicó la técnica de downsizing, que consiste en reducir la cilindrada del motor y hacer trabajar a este en grados de carga mayores, consiguiendo una disminución importante del consumo lo que a su vez se traduce en una menor emisión de CO₂.

El funcionamiento de un sistema de inyección common-rail convencional se presenta a continuación, en el combustible proveniente del depósito, es extraído de este mediante una bomba de combustible, seguidamente pasa por el filtro, para llegar a la bomba de alta presión, la cual deberá otorgar presiones considerablemente altas, el combustible se dirigirá al rail de alta presión y de aquí ya a los inyectores, decidiendo abrir uno u otro en cada momento desde la unidad de control.

Los inyectores en los motores diésel tienen una gran importancia, debido al tipo de combustión por difusión que realizan, estos deben pulverizar el combustible e inyectarlo a alta presión y en poco tiempo, para mezclarlo perfectamente con el aire, lo más cerca posible del punto muerto superior.

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

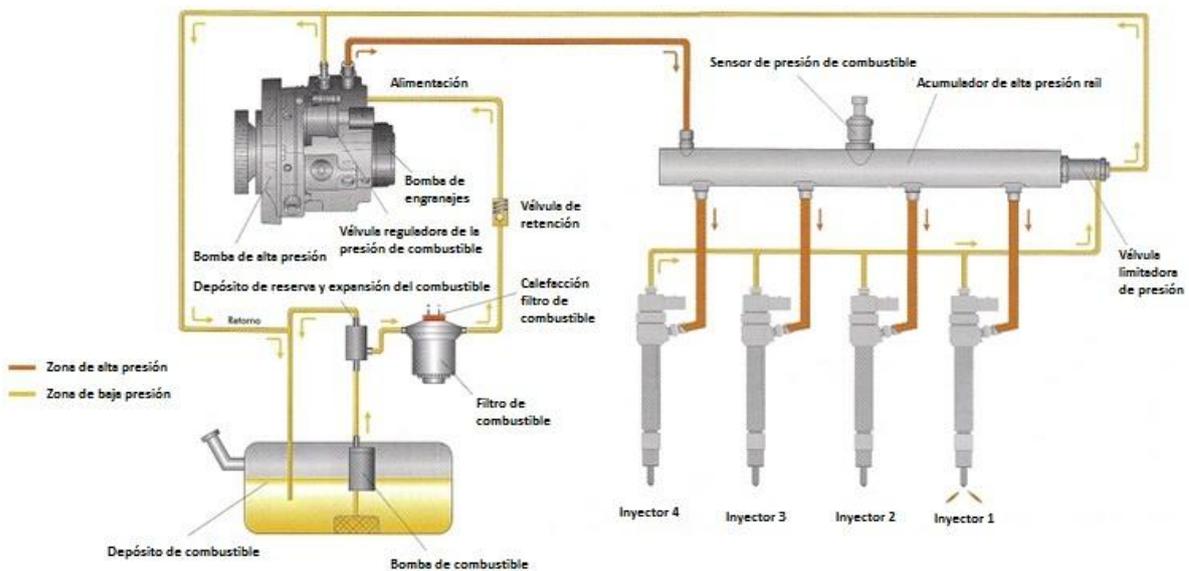


Figura 3.3 : Common-rail

3.5 SISTEMA DE SOBREALIMENTACIÓN

Hoy en día la sobrealimentación de motores de encendido por compresión está totalmente implantada, quedando los MEC atmosféricos totalmente obsoletos en el mercado automovilístico actual, y dicha técnica cada vez está implantándose con mayor fuerza en los motores de encendido provocado, como técnica aplicable después de realizar downsizing a un motor.

El motor del estudio, cuenta con un sistema de turbosobrealimentación, con turbina de geometría variable para mejorar el par motor a bajo régimen, y con un intercooler aguas arriba del colector de admisión, para bajar la temperatura de los gases antes de la entrada de estos en los cilindros.

El intercooler con el que está trabajando el motor Renault R9M con el que se ha ensayado, no es el intercooler original, el que se ha instalado utiliza como fluido intercambiador de temperatura un líquido refrigerante, el mismo utilizado para la refrigeración del motor, lo que mejora la eficiencia del mismo.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

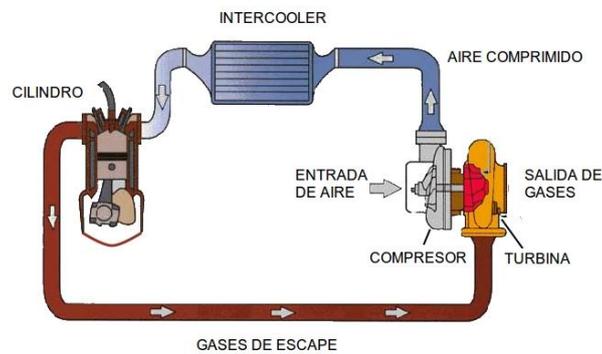


Figura 3.4: Turbo e intercooler

La turbina de geometría variable, consigue modular dicha turbina según las exigencias del motor, concediendo una mayor sobrealimentación a bajo régimen, que si se tratara de una turbina convencional.

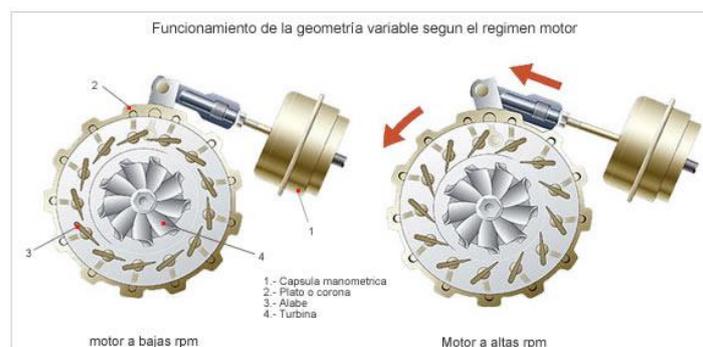


Figura 3.5: Turbina geometría variable

3.6 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Para la refrigeración del motor de combustión interna alternativo, se dispondrá de un sistema totalmente convencional, con un radiador como intercambiador de calor y como fluido de trabajo, un líquido refrigerante anticongelante, además el radiador consta de un electroventilador para ser accionado cuando sea necesario.

Para refrigerar el motor el líquido refrigerante, circula por cámaras en el interior de la culata, y del bloque motor, este líquido circula gracias a la acción de la bomba de agua que es accionada mediante la correa de distribución.

Para alcanzar la temperatura óptima del motor (alrededor de los 90 grados centígrados), este consta de un termostato, el cual impide la recirculación del fluido refrigerante, haciendo que esta temperatura se alcance en menor tiempo.

3.7 SISTEMA DE LUBRICACIÓN

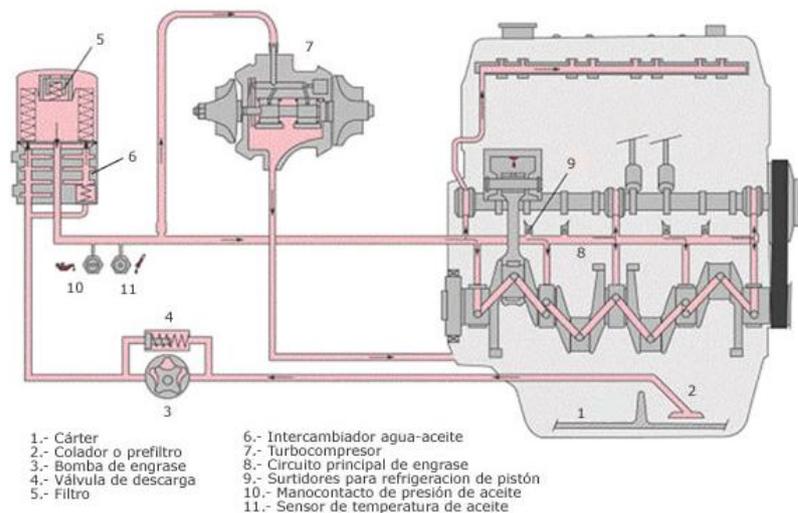
Los elementos que se encuentran en movimiento en el motor sufren grandes rozamientos durante su funcionamiento. Estas partes absorben una gran cantidad de trabajo que es transformada en calor, a consecuencia de dicho rozamiento, se produce una pérdida de energía. Esta energía puede ser elevada, haciendo que las piezas se dilaten. Si las piezas del motor se dilatan demasiado por un rozamiento excesivo pueden llegar a gripar, provocando una grave avería en el motor, y aquí es donde reside la gran importancia del sistema de lubricación en los motores de combustión.

Como lubricante se utiliza aceite con diferentes grados de viscosidad. Gracias a este las piezas que se mueven en contacto, el rozamiento que se producirá entre ellas será más suave, el trabajo absorbido será menor y, por tanto, serán menores las pérdidas por fricción.

El sistema de turbosobrealimentación también necesitará de lubricación, como el turbo está sometido a altas temperaturas, el engrase de los cojinetes es muy importante.

El engrase en los turbos de geometría variable como el que dispone el motor Renault R9M es de mayor necesidad ya que además de los rodamientos tiene que lubricar el conjunto de varillas y palancas que son movidas por el depresor neumático.

A continuación se puede observar un esquema del sistema de lubricación convencional de un motor diésel sobrealimentado.



Esquema de engrase de un motor Diesel de inyección directa

Figura 3.6: Sistema de lubricación

CAPÍTULO 4:

SISTEMA EGR

4.1 INTRODUCCIÓN

Los primeros motores diésel de inyección directa sobrealimentados de pequeña cilindrada, cuyo origen se remonta a los años 60, ya utilizaban el sistema de recirculación de gases, otra de las primeras aplicaciones de esta técnica, tenían como propósito reducir la autodetonación en motores de encendido provocado.

En la actualidad el sistema de recirculación de gases de escape está totalmente implantado tanto en motores de encendido provocado como en los encendidos por compresión, siendo mayor su uso en estos últimos, debido a la alta producción de NO_x .

La recirculación de los gases de escape, podría definirse como una técnica de reducción de emisiones de NO_x principalmente, en motores térmicos de combustión alternativa.

El proceso de recirculación de los gases de escape es simple, como su propio nombre indica, consiste en introducir los gases expulsados tras la combustión de nuevo en el colector de admisión y de aquí al cilindro, tras la introducción de estos en la cámara de combustión, lo que se obtiene es un porcentaje menor de oxígeno dentro de esta, ya que se está introduciendo mayoritariamente CO_2 y agua, por lo que, se está aumentando la proporción de gases inertes dentro del cilindro lo que se traduce en una combustión a menor temperatura.

4.2 SISTEMA EGR

El principal objetivo de la reducción de la temperatura es el de bajar la emisión de NO_x , como se comentaba anteriormente, los cuales se ven fuertemente aminorados al realizar el sistema de recirculación.

Aunque no todo son ventajas a lo que respecta al sistema de EGR, sino que surgen una serie de inconvenientes, entre los que cabe destacar:

- Debido a su influencia sobre el trabajo de bombeo, puesto que el proceso de recirculación de los gases de escape estará incluido en este trabajo, se presenta una considerable pérdida de potencia y peor funcionamiento del motor.
- Un inconveniente que presentara el EGR de alta presión, el cual se explica a continuación será el peor funcionamiento del sistema de sobrealimentación, también traducido en una pérdida de potencia.
- Otro problema que surge al realizar EGR, debido a la peor oxidación del combustible es el de mayor producción de monóxido de carbono (CO) y partículas, de aquí nace la importancia de instalar un filtro de partículas y un catalizador de oxidación antes de expulsar los gases de escape al ambiente.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

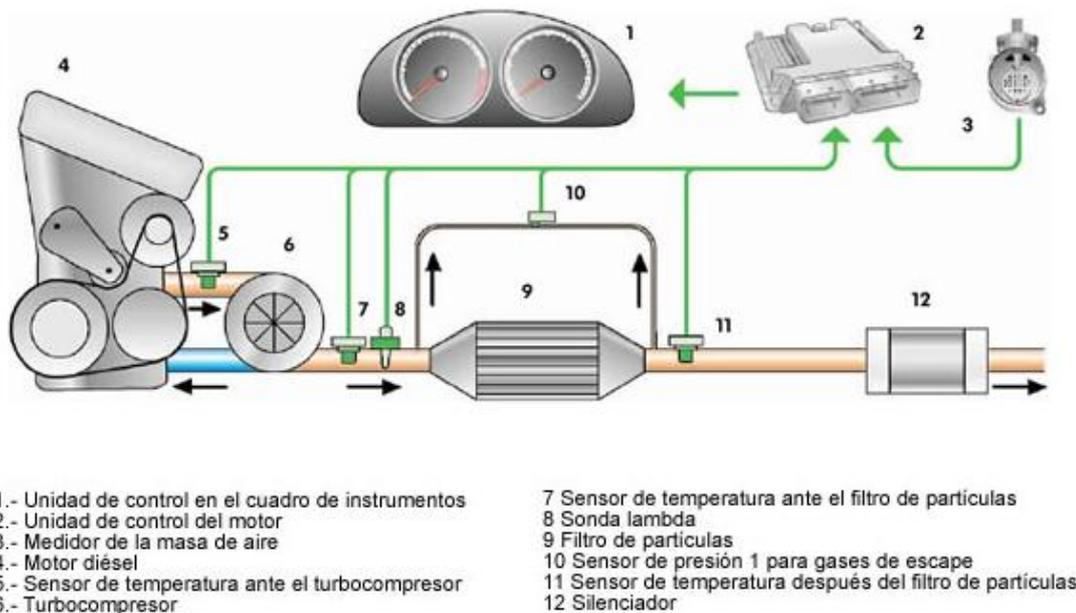


Figura 4.1 : FAP + Catalizador

Existen diversos métodos para reintroducir el gas de nuevo en la admisión, las clasificaciones de mayor importancia se presentan a continuación.

1. En cuanto a sistemas EGR atendiendo al lugar de extracción de gases se pueden clasificar en EGR interno y EGR externo:
 - EGR **interno**: Esta técnica se basa en extraer el gas a recircular sin necesidad de ningún dispositivo adicional, esto se consigue mediante un perfil característico de las levas, que consiguen que las válvulas de escape abran durante la carrera de admisión. Este método tiene la ventaja su simplicidad constructiva, pero en contraposición necesitan mayores presiones de sobrealimentación, y su nula capacidad de regulación.
 - EGR **externo**: En este caso el gas que se utilizará en la recirculación, procede de algún punto del escape del motor, el gas fluye por un conducto gracias al gradiente de presiones, este sistema tiene como ventaja que puede ser regulado mediante una válvula, para limitar la cantidad de gas de escape que se dirige hacia la admisión.

En este caso el sistema EGR utilizado por el motor de este proyecto, será externo. Ya que el interno actualmente se encuentra obsoleto, aunque con los nuevos sistemas de distribución variable, puede solventarse el problema de regulación y vuelven a ser objeto de estudio.

2. Dentro de los sistemas de recirculación de EGR externo, estos se pueden dividir, en EGR de alta presión y EGR de baja presión, los cuales puede verse esquematizados en la siguiente imagen:

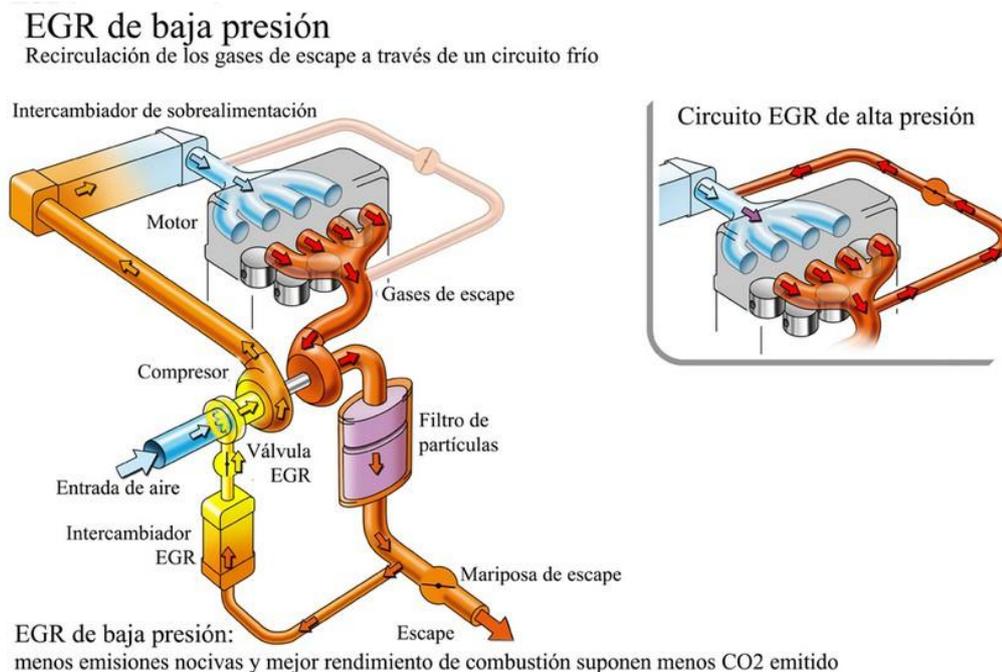


Figura 4.2: Sistemas EGR

- EGR de **alta presión**: Los gases de escape van directamente al colector de admisión, lo que supone, encontrarse con dos problemas principales :
 - En el proceso de accionamiento de la turbina del compresor, se presentan mayores dificultades debido a que no todos los gases pasan por la turbina
 - Y en segundo lugar, al introducir gases a alta temperatura en la cámara de combustión, sube la densidad global de admisión, lo que se contrapone al trabajo realizado previamente por el compresor y el intercooler.
- EGR de **baja presión**: En este sistema la totalidad de los gases de escape pasan por la turbina, por el filtro de partículas, y a continuación se encuentra con una válvula, la cual recircula parte de los gases hacia un intercambiador y parte al escape, la parte que pasa por el intercambiador, posteriormente se introduce en el compresor, y de aquí pasaría al intercooler y por último a la cámara de combustión. Este tipo de recirculación solventa los problemas que se presentaban en el sistema de alta presión, pero a bajas temperaturas pueden aparecer condensados en la rueda del compresor que dañen la rueda del compresor.

El motor Renault R9M dispone de ambos tipos de recirculación, pudiéndose ser usados indistintamente, utilizando uno de los dos o ambos.

3. Por último otra forma de clasificación del sistema de recirculación consiste en la división entre EGR de adición y de sustitución:
 - **EGR de adición:** En este caso la masa de aire que admite el motor se mantiene constante por lo que, los gases de escape recirculados suponen una masa adicional. El EGR de adición se lleva a cabo solo en motores MEP, ya que este tipo de motores trabajan siempre con dosado estequiométrico, ya que así lo exigen los de post-tratamientos de gases.
 - **EGR de sustitución:** En esta clase de recirculación, la masa total admitida por el cilindro se mantiene constante, de modo que el gas de escape desplaza parte de aire fresco. Este sistema es el llevado a cabo por los motores diésel (MEC), ya que estos motores al no disponer de válvula de mariposa siempre admiten la misma cantidad de aire, el cual puede ser un cierto porcentaje, proveniente de los gases de escape.

El motor objeto de estudio al ser de encendido por compresión, utilizara el sistema de EGR de sustitución.

4.3 MECANISMO DE FORMACIÓN DE NO_x

En motores diésel, la formación de NO_x supone uno de los principales impedimentos a la hora de cumplir los límites de emisiones establecidos por la norma EURO.

Dentro de los NO_x, el NO, representa el 80-95% de los NO_x producidos por un motor. No obstante, el más nocivo para la salud es el NO₂, principalmente por su participación en la formación de ozono troposférico (O₃), muy asociado al smog fotoquímico que está fuertemente relacionado con la producción de cáncer. Sin embargo, las limitaciones de emisión se aplican sobre los NO_x totales.

La principal fuente de NO es debido a la oxidación del nitrógeno molecular que se encuentra en la atmósfera, aunque el nitrógeno que contiene el combustible es también considerado como una fuente, siendo esta de menor incidencia para la formación de NO. Las emisiones de NO dependen de varios factores, ordenados por orden de importancia se enumeran a continuación.

- Temperatura de los gases quemados.
- Presión alcanzada dentro del cilindro.
- Concentración de oxígeno dentro del cilindro.

El mecanismo de formación de NO a partir de nitrógeno atmosférico, está gobernado por las reacciones que se presentan a continuación:

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.



Dichas ecuaciones corresponden al mecanismo térmico de **Zeldovich**¹, el cual se encuentra ampliamente extendido como proceso de formación de NO.

Por último en la figura 4.3 es posible ver el cambio producido en los gases de escape al realizar EGR(línea azul), con respecto al motor funcionando en condiciones normales(línea roja).

En el eje de abscisas se encuentra la temperatura en grados Kelvin de la cámara de combustión, y en el de ordenadas el exceso de aire, ("Soot" corresponde al porcentaje de partículas generadas).

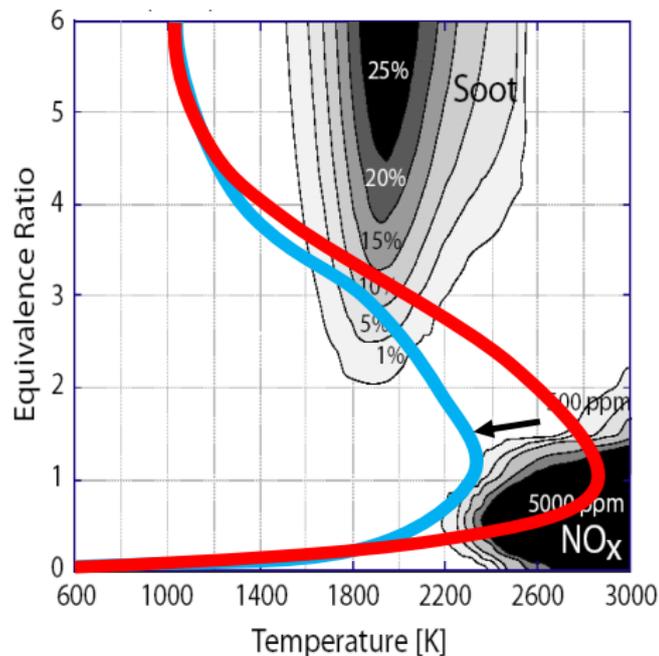


Figura 4.3: Emisión de NOx y partículas

4.4 FORMACIÓN DE PARTÍCULAS

Las partículas incluyen:

- Hollín (producido exclusivamente en la combustión, por una oxidación incompleta)
- Otras partículas (sólidas y líquidas)
 - Debidas principalmente a, impurezas en el combustible y restos de aceite.

La formación de partículas, se ve fuertemente influenciada con el uso del sistema de recirculación de gases(EGR), a mayor grado de EGR, mayor será la formación de estas, por lo que no se podrá bajar la emisión de NOx sin que la tasa de partículas producidas aumente.

4.5 FORMACIÓN DE CONDENSADOS

La formación de condensados es principalmente debida a la tendencia actual de refrigerar los gases de escape antes de proceder a la recirculación al motor. Estos compuestos químicos pueden causar problemas cuando condensan y se aglomeran en los conductos a lo largo del sistema EGR.

Este problema tiene mayor repercusión en los sistemas de EGR de baja presión, ya que en los sistemas de alta presión solo aparecen en durante la primera etapa de arranque en frío. Una vez se alcanza la temperatura optima de funcionamiento del motor, alrededor de unos 90°C, es prácticamente imposible la aparición de estos.

Sin embargo, en los sistemas de baja presión, se presentan dos problemas:

- Por un lado la temperatura a la que llegan los gases al pasar por el intercooler es bastante más baja, esto provoca que el agua contenida en el gas condense, con la posible aparición de ácido sulfúrico debido al contenido en azufre del combustible fósil. El ácido sulfúrico tiene un alto valor de PH, por lo que el diseño de los conductos del sistema EGR está condicionado a este.
- Y el otro problema que se presenta, se da al introducir los gases recirculados que provienen en primer lugar del filtro de partículas y a continuación del intercambiador de EGR, estos gases bajan considerablemente su temperatura y al introducirlo en la rueda del compresor del sistema de sobrealimentación, los condensados pueden producir graves daños en esta.

CAPÍTULO 5:

SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

5.1 INTRODUCCIÓN

Para la realización de los diversos ensayos, es de vital importancia la captación de los diferentes datos referentes al motor que sirvan de análisis.

Para ello se han obtenido datos principalmente de dos fuentes, una se trata de la ECU, (Engine control Unit) de la que se registran más de 140 variables, y la otra se basa en los diversos sistemas de medidas mediante diferentes sensores de diversos parámetros que se han instalado en el motor, de los cuales se obtienen casi 100 variables.

5.2 ECU

En los primeros años tras el nacimiento del primer automóvil, la conducción de estos se realizaba prácticamente solo por personas con amplios conocimientos en mecánica, debido a la complejidad que conllevaba la conducción y el manejo de estos.

Durante los años posteriores la conducción se fue facilitando para que pudiese ser realizada por cualquier persona, y conforme fue avanzando la tecnología, fueron apareciendo diferentes sistemas mecánicos, que podrían actuar cambiando diferentes parámetros en función del régimen y grado de carga, como por ejemplo los colectores de admisión de geometría variable, que utilizaban un colector de mayor longitud para bajo régimen, y uno mayor para valores más altos de revoluciones, esto mejoraba notablemente el rendimiento volumétrico gracias a la mejor sintonización de los colectores.

Por último ya surgen los sistemas electrónicos, que pueden controlar cualquier parámetro del motor como por ejemplo el uso de la sonda lambda que analiza los gases de escape, esta información es enviada a la unidad de control, y esta decide actuar sobre diferentes actuadores para conseguir trabajar con el dosado relativo que se desee.

El nacimiento de la unidad de control esta fuertemente influenciado por el siguiente motivo, y es que en los años 80 en Estados Unidos empiezan a surgir exigentes normativas de regulación en lo respecta a las emisiones contaminantes, lo que impulsaron más por necesidad de que por otro motivo, a un cambio de mentalidad y de forma prácticamente obligatoria se produjo un cambio de lo mecánico a lo electrónico en lo que se refiere ejecución y regulación de los diversos parámetros, que anteriormente eran realizados por distintos sistemas neumáticos y mecánicos y posteriormente pasarían a ser controlados por esta unidad de control, de manera electrónica, para poder controlar de manera más eficaz todo lo que se refiere a un mejor funcionamiento del motor y control de emisiones.

Una posible definición de una ECU sería, la de unidad de control electrónico que regula el funcionamiento del motor. Hoy en día los vehículos constan de un complejo sistema electrónico compuesto por sensores y actuadores, en la que los sensores tienen como misión la de informar a la unidad de control, y esta se encarga de enviar las ordenes necesarias a los diferentes actuadores para llegar al punto de funcionamiento deseado.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

Los sistemas de control pueden clasificarse en dos tipos:

- Bucle abierto: La acción de control no tiene en cuenta la diferencia entre el valor de la variable y el valor deseado.
- Bucle cerrado: La acción de control se calcula a partir de la diferencia entre el valor medido de la variable y el valor objetivo (uso generalizado del PID).

En los ensayos experimentales realizados, la ECU será de gran uso, ya que desde ella se podrán obtener numerosas mediciones de parámetros del motor, así como controlar los diferentes actuadores de los que dispone el motor, para ir cambiando cada uno de los diferentes parámetros que sean necesarios.

Lo que resultará de total interés es el mecanismo electromecánico que actúa en la válvula EGR de alta presión, permitiendo así controlar cual es el grado de recirculación que se quiere implantar en el motor en cada instante, para poder llevar a cabo la reducción de NOx que es el principal objetivo del presente trabajo.

5.3 SISTEMA DE MEDIDAS

Antes de la realización de los ensayos, será necesario dotar al motor de numerosa instrumentación de medida, en los que se medirán diferentes datos de gran importancia, como temperaturas, presiones, caudales, emisiones de contaminantes...así como par producido por el motor o la posición del pedal del acelerador.

Algunas mediciones de vital interés para la realización de los ensayos serán las que se presentan a continuación:

SPEED	Revoluciones por minuto
PEDAL_POSITION	Posición del pedal
TORQUE	Par
PME	Presión media efectiva
POWER	Potencia
GEAR	Marcha
VEHICLE SPEED	Velocidad del vehículo
MASS FLOW RATE	Caudal de aire
FUEL MASS FLOW	Caudal de aire
BSFC	Gasto efectivo
REL. FA RATIO	Dosado Relativo

Tabla 5.1: Datos

En la tabla , se encuentran plasmados parámetros de gran importancia, como las revoluciones por minuto y la posición del pedal, que serán parámetros gobernados desde el puesto de control, para realizar el ensayo en unas condiciones determinadas.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

Otra medición de gran interés es el par que está otorgando el motor en cada instante, el cual dirá cómo se comporta al llevar a cabo una estrategia de reducción de NO_x u otra. La medición de par en cada instante es llevada a cabo por un torquímetro instalado a la salida del cigüeñal.

La medida del consumo de combustible resulta de gran interés, para saber la cantidad de combustible consumido, y combinando dicha medición con la medida de caudal de aire, es posible hallar el valor de dosado relativo con el que está trabajando el motor, en cada instante .

Conocer la cantidad de aire que entra en el motor es de suma importancia, ya que a partir de este como se comentaba anteriormente será posible conocer el dosado relativo, así como también el rendimiento volumétrico en cada instante.

La medida de temperaturas de los diferentes fluidos que circulan por el motor, es totalmente indispensable para conocer en cada instante el estado del motor, y como se está realizando el proceso de combustión.

Para la medición de temperaturas, será preciso contar con diferentes termopares con diferentes rangos de medidas.

Un termopar es un sensor de temperatura cuyo funcionamiento se basa en la unión de dos metales distintos, donde se produce una diferencia de potencial, del orden de mini voltios, función de la diferencia entre cada uno de los extremos, esto es producido gracias al denominado efecto Seebeck.

Las diferentes medidas en diversas localizaciones del motor en las que se ha creído oportuno la instalación de sensores son las siguientes:

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

AMBIENT T.	Temperatura ambiente
AIR INLET T.	Temperatura a la entrada del filtro de aire
COMPRESSOR INLET T.	Temperatura a la entrada del compresor
COMPRESSOR OUTLET T.	Temperatura a la salida del compresor
CAC INTLET T.	Temperatura a la entrada de intercooler
CAC OUTLET T.	Temperatura a la salida del intercooler
INTAKE T.	Temperatura admisión
INTAKE EGR T.	Temperatura en la válvula EGR
INTAKE PIPE T. 1	Temperatura en la pipa 1 de admisión
INTAKE PIPE T. 2	Temperatura en la pipa 2 de admisión
INTAKE PIPE T. 3	Temperatura en la pipa 3 de admisión
INTAKE PIPE T. 4	Temperatura en la pipa 4 de admisión
INTAKE PIPE T. 5	Temperatura en la pipa 5 de admisión
INTAKE PIPE T. 6	Temperatura en la pipa 6 de admisión
INTAKE PIPE T. 7	Temperatura en la pipa 7 de admisión
INTAKE PIPE T. 8	Temperatura en la pipa 8 de admisión
EXH CYLINDER T. 1	Temperatura de los gases a la salida del primer cilindro
EXH CYLINDER T. 2	Temperatura de los gases a la salida del segundo cilindro
EXH CYLINDER T. 3	Temperatura de los gases a la salida del tercer cilindro
EXH CYLINDER T. 4	Temperatura de los gases a la salida del cuarto cilindro
EXH EGRHP PIPE T.	Temperatura de los gases en la pipa de EGR a alta presión
TURBINE INLET T.	Temperatura a la entrada de la turbina
TURBINE OUTLET T.	Temperatura a la salida de la turbina
HP EGR VLV INLET T.	Temperatura a la entrada de la válvula EGR de alta presión
HP EGR VLV OUTLET T.	Temperatura a la salida de la válvula EGR de alta presión
FAP OUTLET T.	Temperatura a la salida del filtro de partículas
LP EGRc INLET T.	Temperatura a la entrada de la válvula EGR de baja presión
LP EGRc OUTLET T.	Temperatura a la salida de la válvula EGR de baja presión
ENGINE OUTLET T.	Temperatura gases a la salida del motor
THERMOSTAT INLET T.	Temperatura en el termostato
OIL1 T.	Temperatura de aceite1
OIL2T.	Temperatura de aceite2
BLOCK T.	Temperatura bloque motor
FUEL INLET T.	Temperatura entrada combustible
EGRLP COOLANT INLET T.	Temperatura de entrada de refrigerante
EGRLP COOLANT OUTLET T.	Temperatura de salida de refrigerante
CAC COOLANT INLET T.	Temperatura del refrigerante a la entrada del intercooler
CAC COOLANT OUTLET T.	Temperatura del refrigerante a la salida del intercooler
VESSEL COOLANT T.	Temperatura vaso expansión

Tabla 5.2: Temperaturas

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

A parte de la temperatura, también será necesario contabilizar la presión de diferentes fluidos que se encuentran en el motor.

Para la medición de estas han sido utilizado transductores piezoresistivos, el funcionamiento de estos sensores consiste en la variación que tienen algunos materiales, para cambiar su resistencia eléctrica cuando se ejerce una presión sobre ellos.

En cuanto a presiones se refiere se han tomado las siguientes medidas:

ENGINE COOLANT P.	Presión liquido refrigerante
THRTL INLET P.	Presión de aire a la entrada del filtro de aire
THRTL OUTLET P.	Presión de aire a la salida del filtro de aire
COMPRESSOR INLET P.	Presión aire a la entrada del compresor
BOOST P.	Presión de sobrealimentación
TURBINE INLET P.	Presión a la entrada de la turbina
TURBINE OUTLET P.	Presión a la salida de la turbina
HP EGR INLET P.	Presión a la entrada de la válvula EGR de alta presión
HP EGR OUTLET P.	Presión a la salida de la válvula EGR de alta presión
LP EGRc INLET P.	Presión a la entrada de la válvula EGR de baja presión
LP EGRc OUTLET P.	Presión a la salida de la válvula EGR de baja presión
OIL P.	Presión del aceite

Tabla 5.3: Presiones

Por último, sin lo que los ensayos carecerían de sentido para el presente trabajo final de grado, es la toma de datos de las diferentes emisiones contaminantes y la concentración de cada una de ellas.

Para ello, el departamento de maquinas térmicas dispone de la instrumentación necesaria, el equipo utilizado para el análisis de la composición de los gases de escape es el Horiba, este equipo realiza la medición mediante una sonda instalada a la salida de los gases de escape.

A continuación se representan las diferentes sustancias de las que se obtendrán mediciones:

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

OPACITY	Opacidad de los gases de escape
COH	Monóxido de carbono ``high``
CO2	Dióxido de carbono
COL	Monóxido de carbono ``low``
O2	Oxígeno
THC	Hidrocarburos
CH4	Metano
NOx	Óxidos de nitrógeno
NO	Oxido de nitrógeno
NO2	Dióxido de nitrógeno
CO2 EGR	Dióxido de carbono en válvula EGR
A/F	AIRE/FUEL
LAMBDA	Exceso de aire
EGR	Porcentaje de recirculación
MEGR	Caudal EGR

Tabla 5.4: Contaminantes

Con la toma de datos que se lleva a cabo mediante la lectura de datos de la ECU, como con los que han recogido mediante los diferentes sensores instalados en el motor, se dispone de la suficiente información para realizar cada uno de los ensayos, poder estudiarlos y así sacar diferentes conclusiones, que se encuentran recogidas en el capítulo 6.

CAPÍTULO 6:

ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

6.1 INTRODUCCIÓN

Como se ha comentado anteriormente uno de los principales problemas de los motores de combustión por compresión, es la emisión de óxidos de nitrógeno. Siendo esta mayor a temperaturas bajas del motor.

Y con las normativas EURO cada vez más restrictivas y con el atisbo de que los próximos ensayos deberán ser llevados a cabo a baja temperatura, el propósito del presente documento será el siguiente.

Llevar a cabo diferentes ensayos, para determinar, cual es el grado de apertura óptimo de la válvula EGR de alta presión, y en que instante ha de llevarse a cabo sin que se vean comprometidos el funcionamiento del motor ni las prestaciones.

6.2 ESTRATEGIA BASADA EN LA RECIRCULACIÓN DE GASES (EGR)

El motor con su cartografía original, no comienza a realizar EGR hasta que llega a una temperatura determinada, por lo que para conseguir obtener el certificado de que ha cumplido las directrices de la normativa EURO, será bastante más complejo si la realización de dicha prueba se lleva a cabo a baja temperatura (-7°C).

Así que la primera estrategia a llevar a cabo, consistirá en la recirculación de los gases de escape desde un primer momento, aun estando el motor a bajas temperaturas, esta recirculación se llevará a cabo por el sistema de EGR HP (high pressure), o lo que es lo mismo de alta presión.

Se realizaran diversos ensayos para ver cómo se comporta el motor, aplicando diferentes grados de recirculación, hasta encontrar el grado de EGR óptimo que permite bajar las emisiones de NO_x hasta un valor adecuado, pero sin que este altere demasiado el funcionamiento del motor, y obtener valores de par suficientes para una futura conducción del vehículo.

La realización de los ensayos estarán guiados por las siguientes pautas:

- En primer lugar se programará la sala para que a la hora de realizar el ensayo, el sistema de climatización consiga que la temperatura sea de -7°C, para alcanzar dicha temperatura habrá que esperar 8 horas entre cada ensayo.
- A la hora de realizar el ensayo, se procede a accionar lo que sería el contacto en un automóvil, esto producirá la llegada de corriente a las bujías de encendido, calentando así la temperatura de la cámara de combustión y que sea posible realizar un buen arranque, se debe esperar unos 25 segundos.
- Después de estos 25 segundos con el contacto, se procede a realizar el arranque del motor, y a realizar la puesta en carga de este, las condiciones de trabajo serán, las de un

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

régimen a 1400 revoluciones por minuto, y la posición del acelerador al 15%. El punto seleccionado correspondería en torno a un valor de 4bar de presión media efectiva.

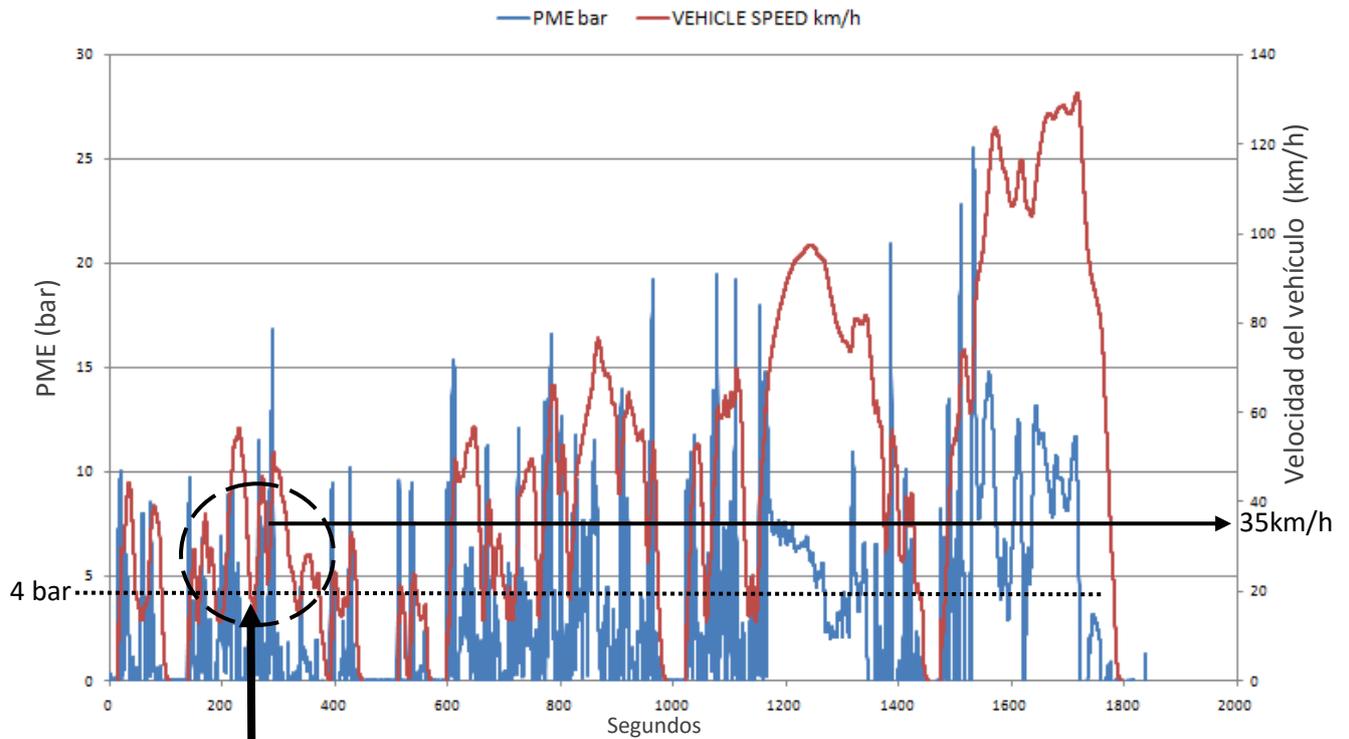


Figura 6.1: Ciclo homologación, PME

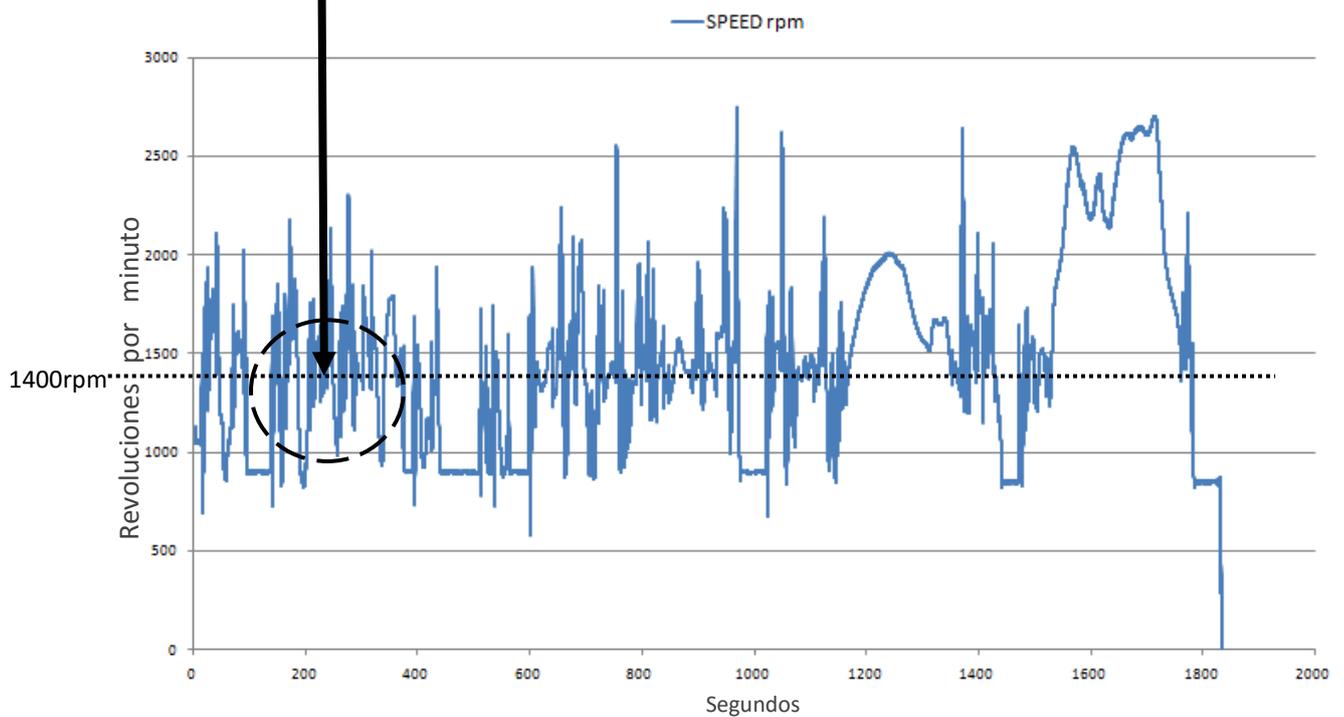


Figura 6.2: Ciclo homologación, revoluciones por minuto

Por lo que el punto en el que se está ensayando correspondería a una velocidad aproximada de 35km/h en un hipotético vehículo.

- Por último se procederá a implantar que se active la recirculación de gases de escape desde el puesto de control, abriendo la válvula de alta presión hasta una posición determinada, esta posición de la válvula se podrá variar con el tiempo, y en cada ensayo.

Cuanto mayor sea el grado de apertura llevado a cabo por la válvula, mayor será la tasa de EGR.

La tasa de EGR como se puede ver en la fórmula 6.1 consiste en la cantidad de masa de gases de escape que son recirculados, partido por la masa total que entraría en los cilindros:

$$\text{TASA DE EGR} = \frac{m_{\text{egr}}}{m_{\text{egr}} + m_{\text{aire}}} \quad (6.1)$$

6.2.1 ENSAYO CON 30% DE APERTURA DE VÁLVULA DE EGR HP Y NO SWIRL

En este ensayo se ha optado por inicialmente aplicar un 30% de apertura a la válvula EGR como valor inicial, e ir aumentando su valor progresivamente, también se ha realizado la alimentación del comburente sin corriente tipo "swirl" o torbellino.

De dicho ensayo se han representado, entre otros parámetros:

- Torque: Par en Nm.
- Mass flow rate: caudal másico de aire fresco en kg/h.
- Vxx_emptv-psn-rel: posición relativa de la válvula EGR.
- NO_x: óxidos de nitrógeno.
- CO: monóxido de carbono.
- THC: Hidrocarburos sin quemar.
- Tasa de EGR.
- Dosado Relativo.

Se observa como al realizar un 30% de apertura de la válvula, la cantidad de aire fresco baja ostensiblemente, ya que al tratarse de un sistema EGR de sustitución, la cantidad de aire suministrado en cada momento, daría un valor bastante aproximado de la cantidad de gases de escape aplicados en cada instante. El par ha sido representado para ver como varía dependiendo el grado de recirculación de gases de escape en cada momento, se puede cerciorar que cuando se aplica un escalón de subida de apertura de válvula, se produce el efecto inverso en el par, que baja hasta que se estabiliza entorno a un valor.

Por último se decide cerrar totalmente la válvula, alrededor del segundo 370, y se ve como el par sube de una forma notoria, aquí se puede confirmar la parte negativa en cuanto a prestaciones se refiere, tiene el sistema EGR. Y como de un 50% de apertura de la válvula a estar completamente cerrada, el caudal de aire fresco aumenta en 50kg/h, que sería un valor aproximado del caudal de gases de escape que se estaría introduciendo con el 50% de apertura de la válvula.

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

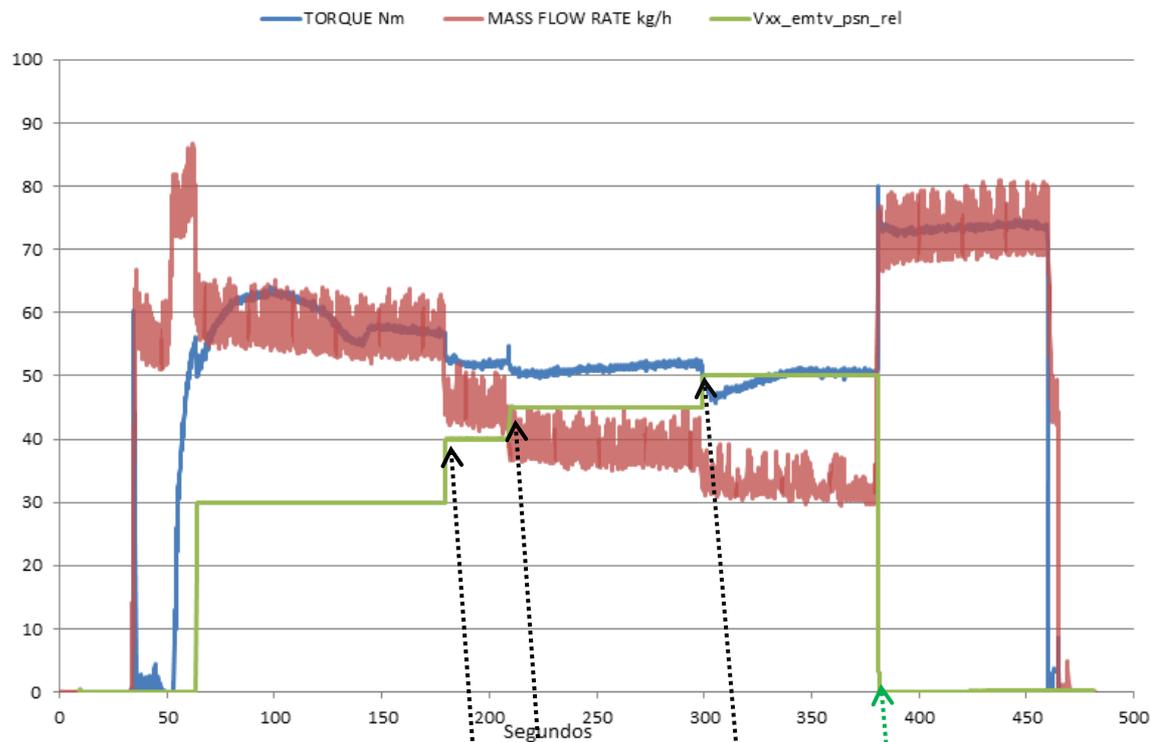


Figura 6.3: Par: Caudal de aire y EGR(30%) no swirl

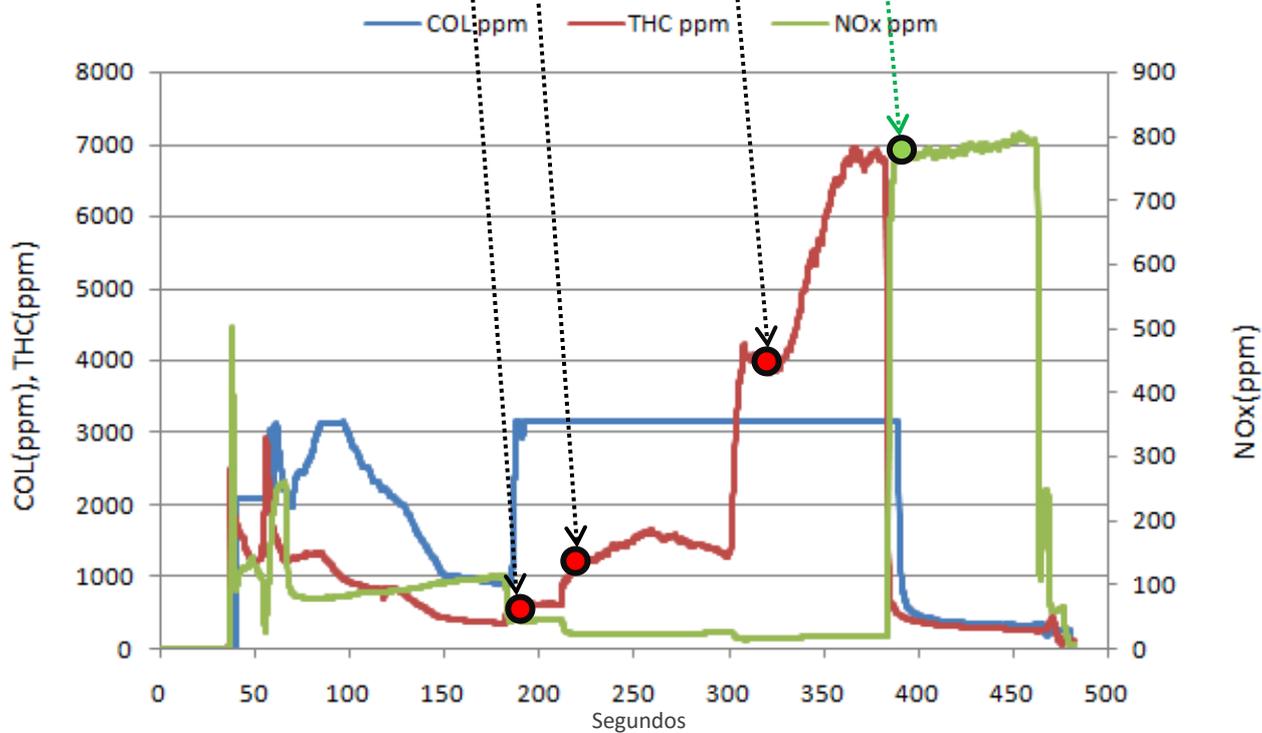


Figura 6.4: Contaminantes EGR(30%) y no swirl

En cuanto a las emisiones, en la anterior grafica se puede observar que va sucediendo, con diferentes grados de apertura de la válvula de EGR.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

Con las flechas negras, se puede ver como el aumento del grado de apertura de válvula, está totalmente relacionado con una mayor emisión de THC, con la flecha verde se observa como al cerrar completamente la válvula de EGR, la producción de NO_x pasa de unos 20ppm hasta 800ppm, de aquí la importancia de la recirculación de los gases de escape.

Los valores de COL, monóxido de carbono(la L corresponde a "low") al llegar al valor de 3142ppm satura, por lo que habrá que medir estos en etapas, en las de mayor EGR con la variable COH(la H corresponde a "high"), que se utiliza para medir altas proporciones de monóxido, pero mide en tanto por ciento respecto al total de los gases de escape, realizando la conversión pertinente mediante la ecuación 6.1, se obtiene el monóxido también en ppm.

$$CO(ppm) = \frac{CO(\%)*10^6}{100} \quad (6.2)$$

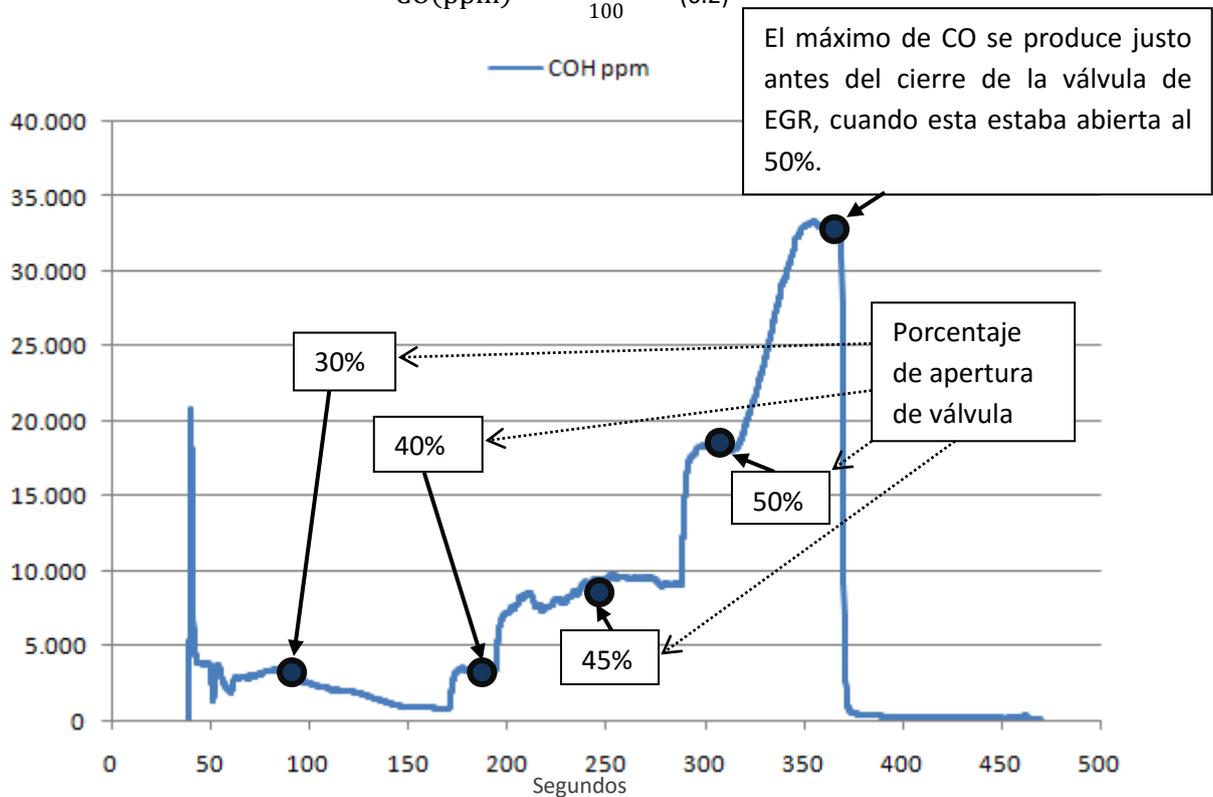


Figura 6.5: CO - EGR(30%) y no swirl

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

La mayor producción de CO, al recircular mas gases de escape, como era comentado anteriormente se debe a su peor oxidación, por el poco porcentaje de oxígeno tras la combustión.

Esto se puede apreciar muy bien en el siguiente grafico:

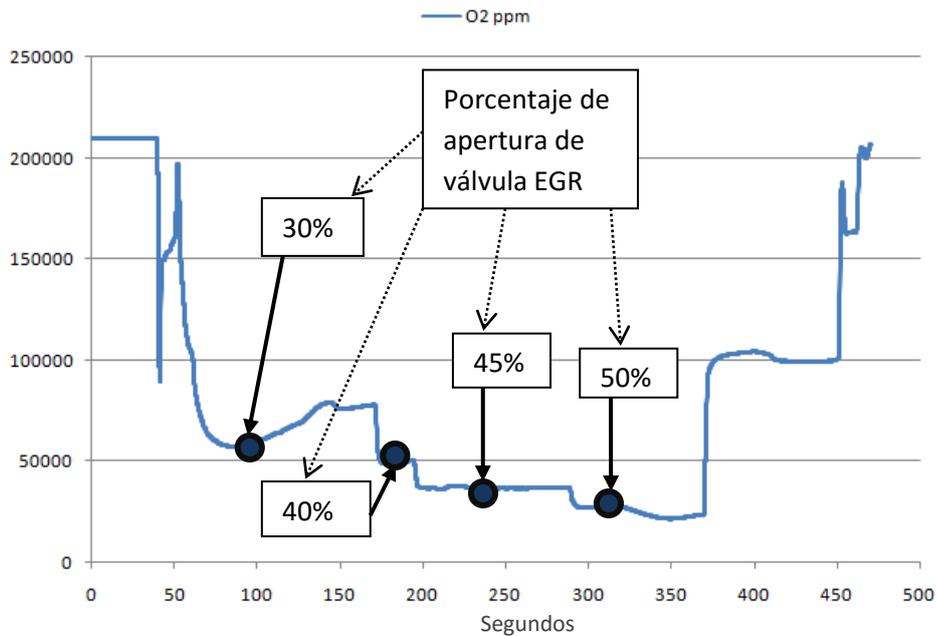


Figura 6.6: O₂ - EGR(30%) y no swirl

Aquí se puede ver como al principio, con el motor totalmente parado en el escape se tiene la proporción de oxígeno del ambiente, con 210000ppm (21%), y como a medida que se ha ido aplicando mayor recirculación de gases, la concentración de O₂ ha ido disminuyendo considerablemente.

A continuación se ilustra en una grafica los efectos que produce la recirculación de gases al dosado, y que tasa de EGR se obtiene con los diferentes grados de apertura de válvula.

En rojo se tiene la tasa de EGR, y en azul el dosado relativo, también se encuentran representados los grados de apertura de la válvula EGR en cada instante, se puede ver como a medida que aumenta la tasa de EGR, debido a mayor grado de apertura de la válvula, el dosado aumenta, superando incluso la unidad, lo que dificultaría el proceso químico de combustión.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

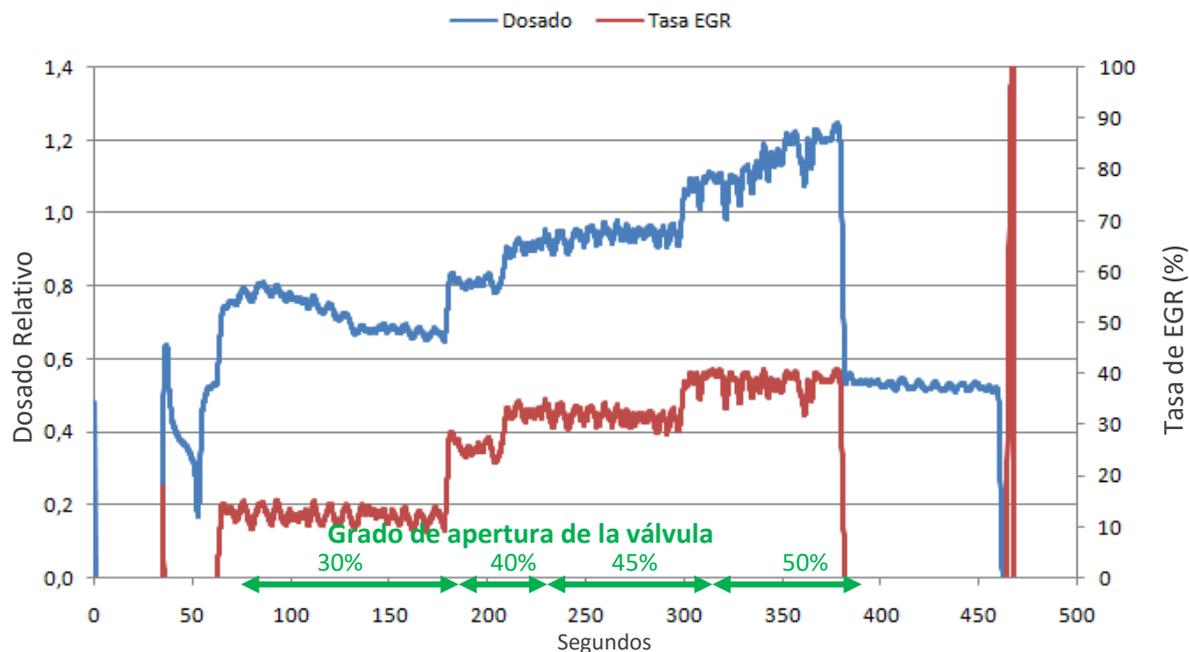


Figura 6.7: Dosado y Tasa de EGR

En los siguientes gráficos, se vislumbran los efectos negativos que tiene la recirculación de gases EGR en el sistema de turbosobrealimentación.

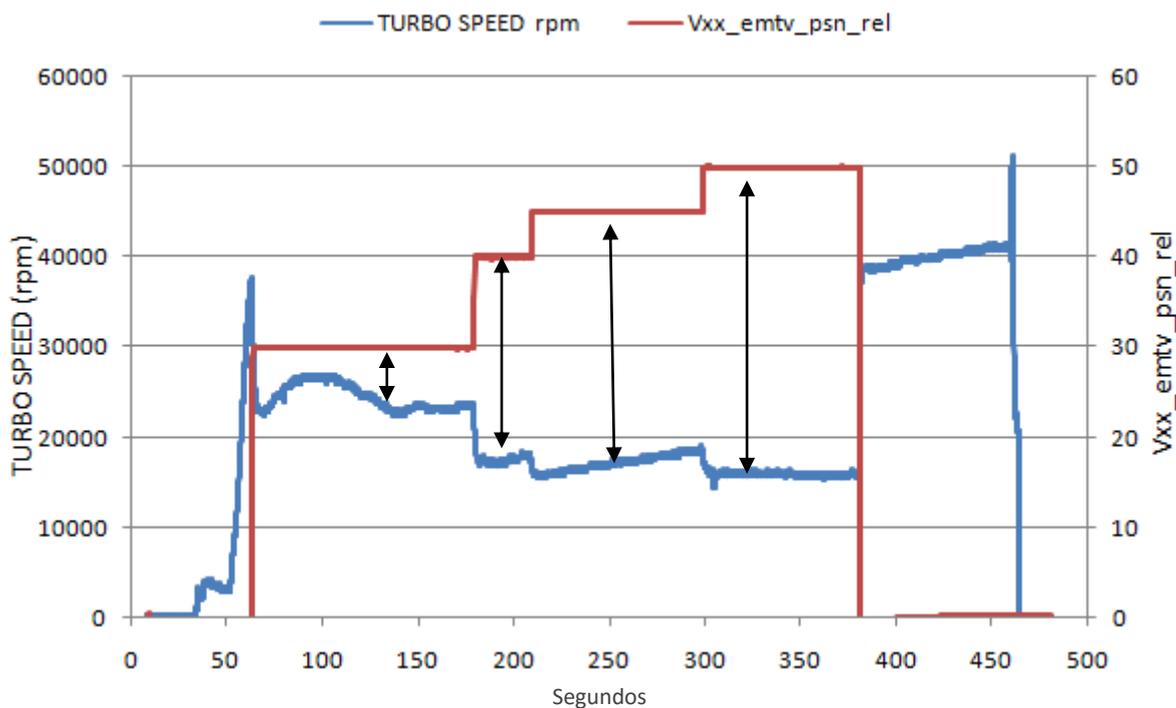


Figura 6.8: Revoluciones turbo

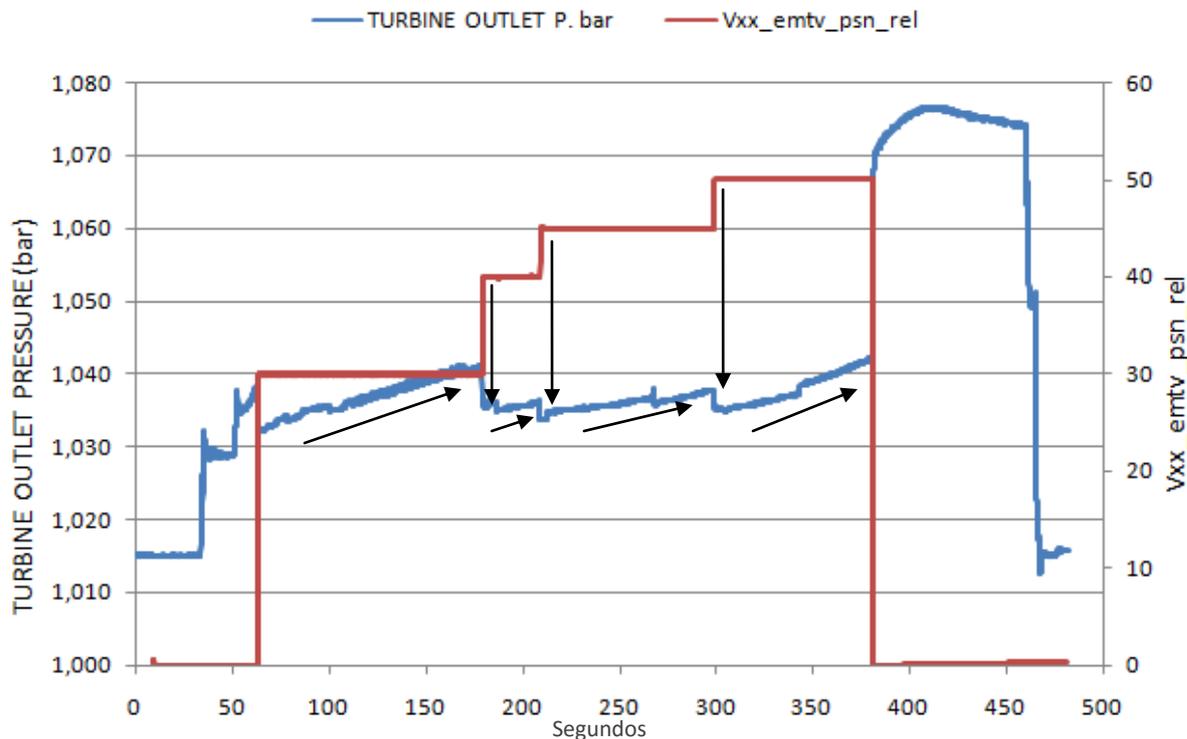


Figura 6.9: Presión salida compresor

En el primer gráfico, se ha decidido plasmar las variables de revoluciones de la turbina del turbocompresor, y el porcentaje de apertura de la válvula EGR, se puede ver cómo ha medida que se abre dicha válvula, el número de revoluciones baja, considerablemente.

En el segundo, y de más valor por lo que representa, se ve dibujadas la presión que se obtendrá a la salida del compresor y nuevamente la evolución de apertura de la válvula EGR, se observa cómo cada vez que se aplica un escalón de subida de recirculación de gases de escape, la presión baja levemente, pero con el paso del tiempo se recupera, se estabiliza y consigue volver a otorgar la presión debida, por lo que la recirculación de los gases de escape afecta principalmente a los transitorios.

6.2.2 ENSAYO CON 30% DE APERTURA DE VÁLVULA DE EGR HP CON SWIRL

En dicho ensayo la estrategia de regulación de la válvula EGR será la misma, y la única diferencia del anterior, consistirá en modificar la posición de la válvula del sistema de alimentación, que se describía anteriormente, por el cual ahora la masa introducida de aire fresco, se introducirá en el cilindro con una corriente tipo "swirl". Esto en teoría debería producir unos valores de par levemente superiores al anterior ensayo debido a una mejor combustión. A continuación se analizan los datos obtenidos.

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

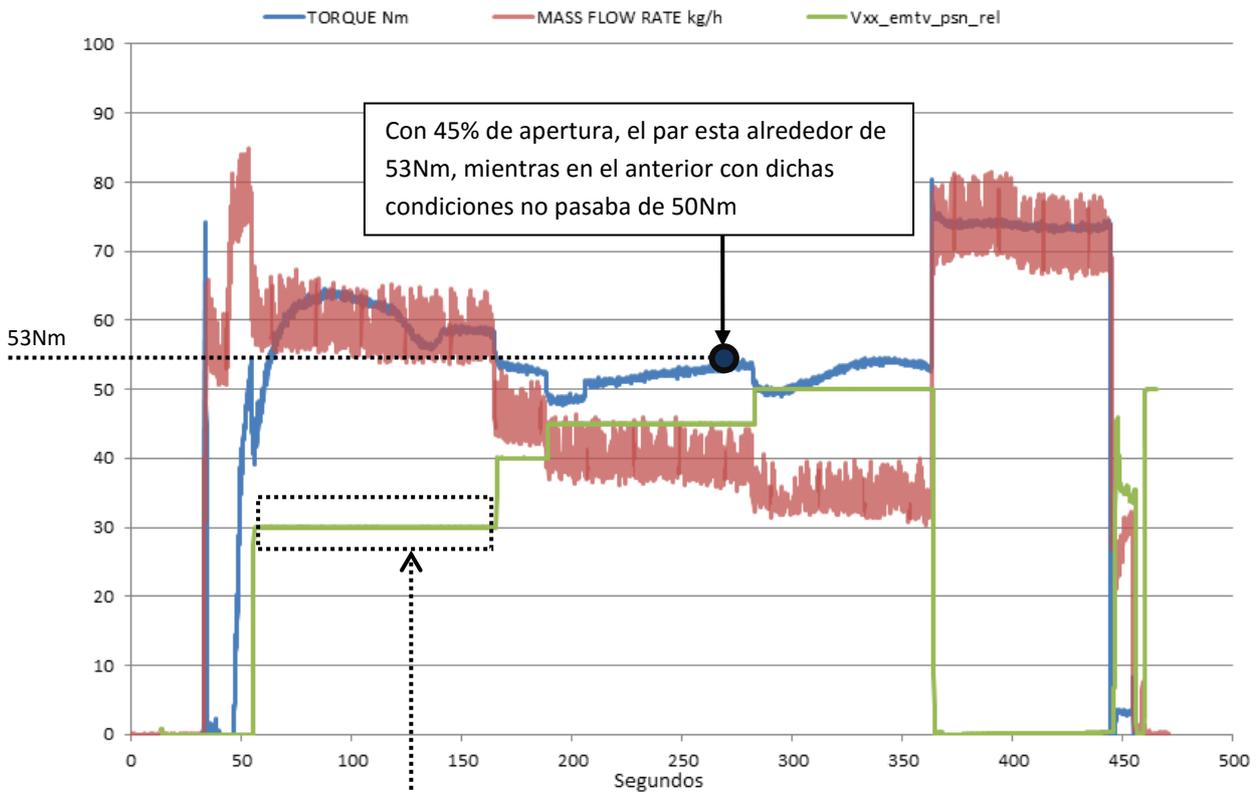


Figura 6.10: Par, Caudal de aire y EGR(30%) con swirl

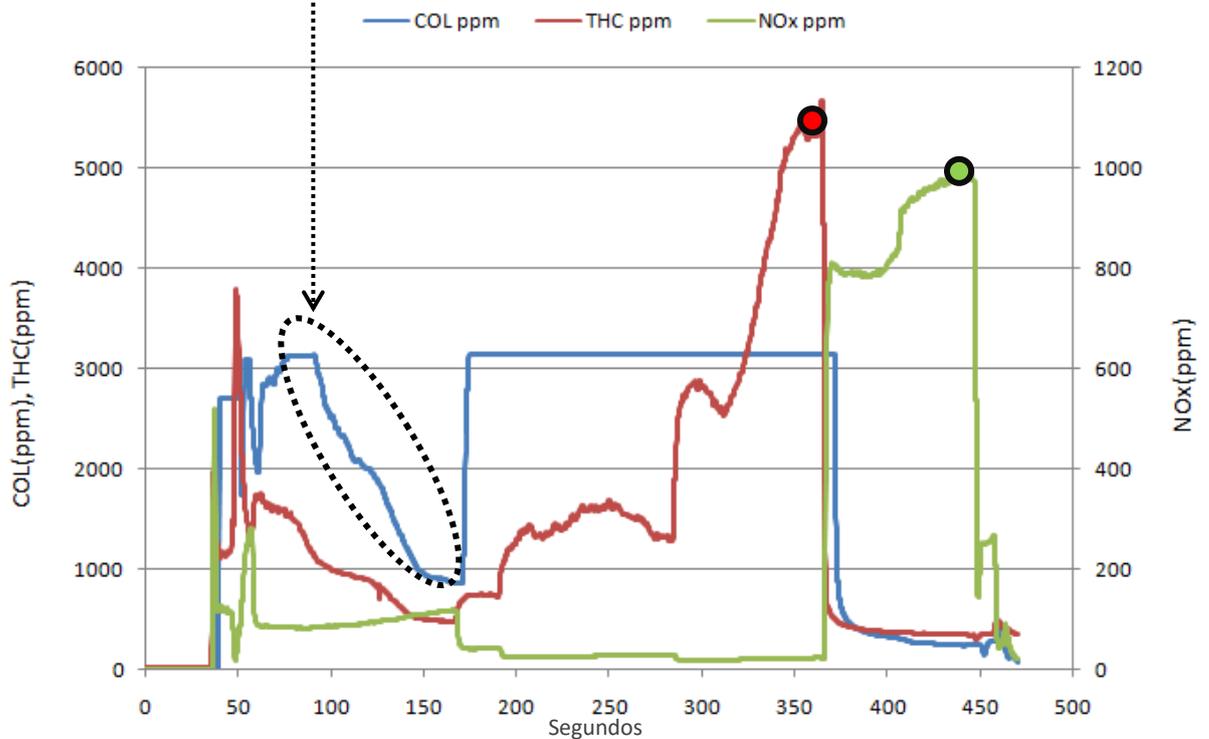


Figura 6.11: Contaminantes EGR(30%) con swirl

Una consecuencia bastante apreciable respecto al ensayo sin "swirl" se da en las emisiones de THC(hidrocarburos sin quemar), que en el primer ensayo, en el instante de un 50% de apertura de válvula EGR, daban un valor de 7000ppm, sin embargo en este ensayo, los valores de THC no superan los 5600ppm, valor apreciable y a tener en cuenta, en el que se observa el efecto directo de este tipo de corriente, que mejora la mezcla aire/combustible.

Pero no todo es positivo, sino que en los valores de NO_x con la válvula totalmente cerrada, se obtenía 800ppm y con la corriente tipo swirl se tienen valores entorno a 1000ppm, ya que mejor combustión, implica mayores temperaturas, lo que se traduce a mayor cantidad de NO_x .

Como se ha realizado en el ensayo anterior, en la siguiente figura se pueden vislumbrar los efectos que produce la recirculación de gases al dosado, y que tasa de EGR se va obteniendo para cada uno de los grados de apertura de válvula, se observa como prácticamente son lineales y a medida que aumenta uno, en este caso la tasa de EGR, el otro que se trata del dosado sigue sus pasos.

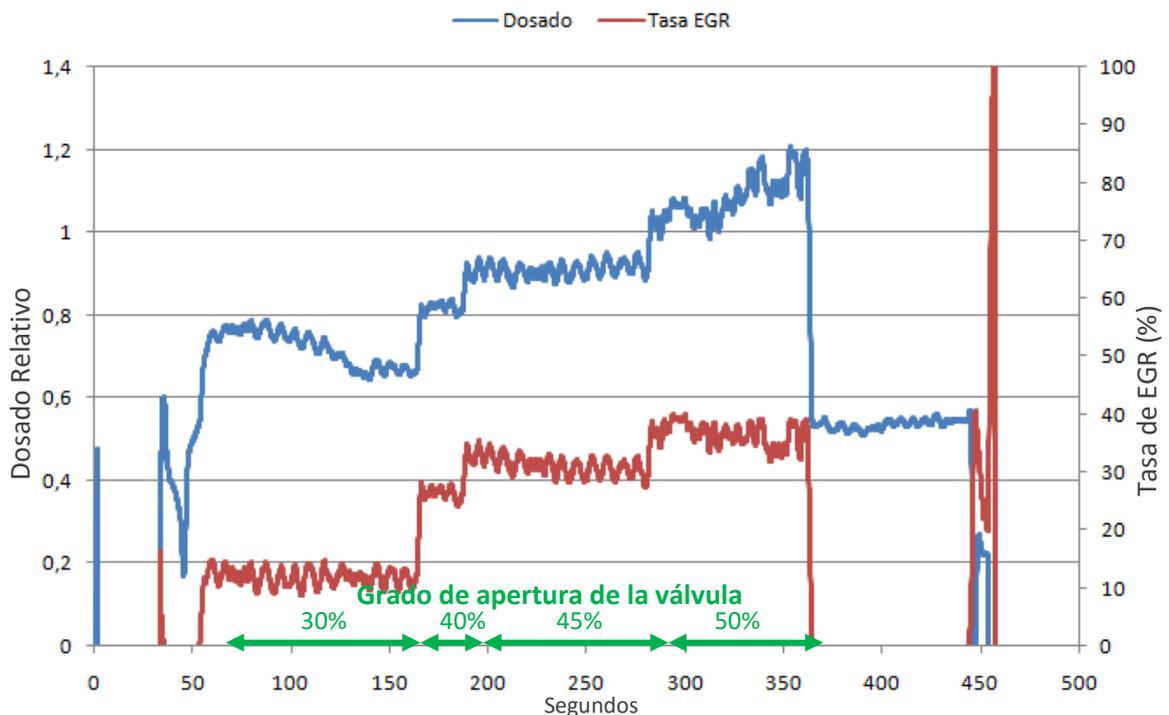


Figura 6.12: Dosado y Tasa de EGR - EGR (30%) con swirl

6.2.3 ENSAYO CON 50% DE APERTURA DE VÁLVULA DE EGR HP CON SWIRL

El tercer ensayo, se diferencia de los anteriores, en un aumento del grado de apertura inicial de la válvula de EGR de alta presión. Este aumento será hasta un 50%, y se incorporara corriente tipo "swirl", con lo que se obtienen los datos que quedan recogidos en las siguientes graficas.

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

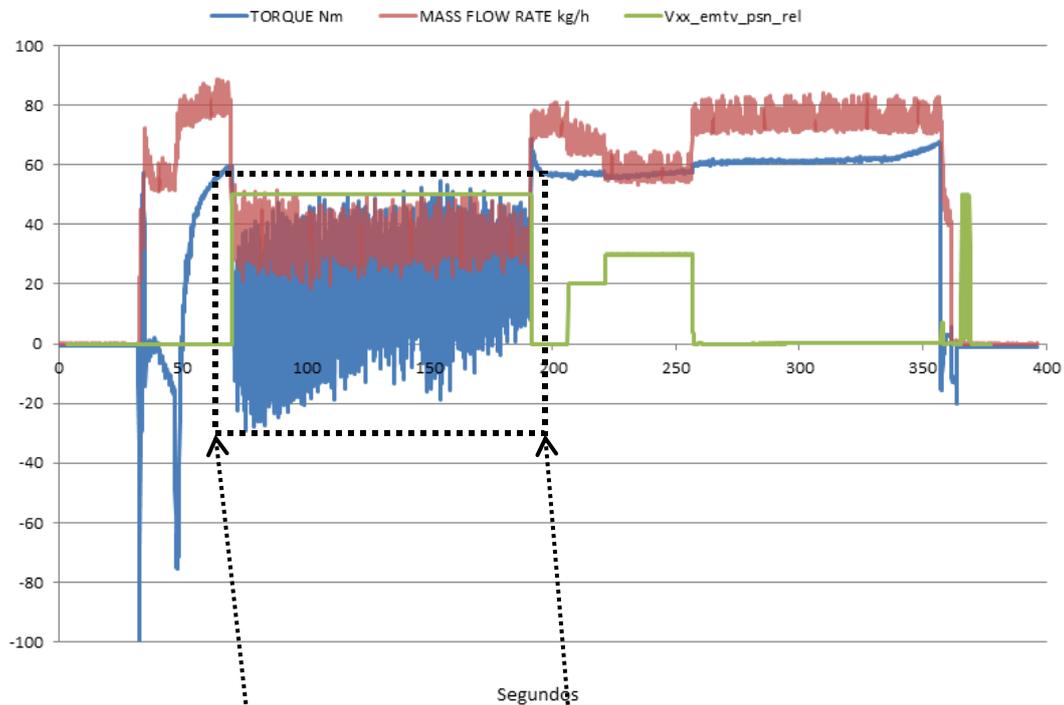


Figura 6.13: Par, Caudal de aire y EGR(50%)

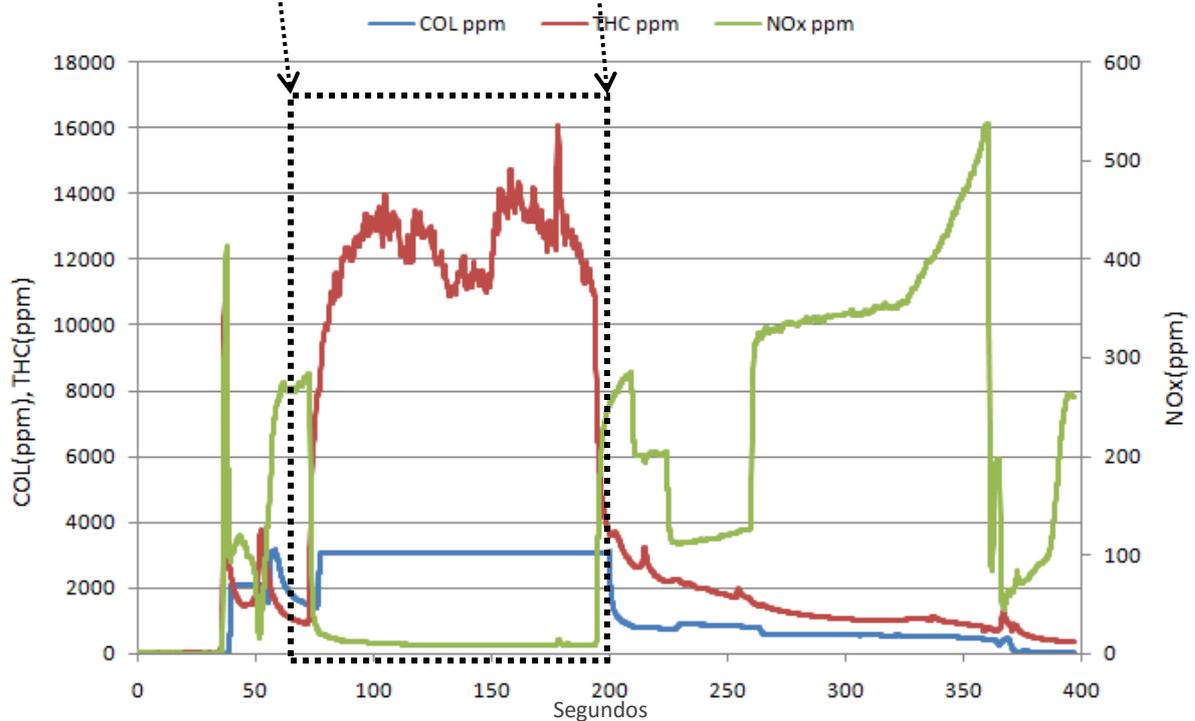


Figura 6.14: Contaminantes EGR(50%)

En las anteriores graficas, es posible observar como alrededor del segundo 70, al aplicar una apertura de válvula de recirculación de los gases de alta presión hasta el 50%, el par del motor baja ostensiblemente, incluso llegando a valores negativos, esto significa que en estos instantes el

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

motor deja de funcionar y es el freno quien hace girar el cigüeñal, el motor no se estabiliza hasta que está cerrada totalmente la válvula.

Durante el periodo de pares negativos, y de "no funcionamiento del motor", la principal consecuencia es la de que la tasa de hidrocarburos sin quemar se dispara hasta valores de 16000ppm. Y la tasa de NO_x se reducen prácticamente a 0 ya que la combustión que se está realizando es prácticamente nula.

Otra importante secuela de este ensayo, se da en los CO, que teniendo cerrada la válvula de EGR, estos se van reduciendo, debido principalmente al aumento de temperatura en el cilindro, hasta que se aplica un grado de apertura del 50% de la válvula EGR, que suben categóricamente, hasta llegar a saturar la medición de CO "low".

A continuación se representa la cantidad de COH en partes por millón, ya que la COL ha saturado. Donde se puede observar esa disminución que anteriormente era comentada, sin aplicar EGR, y la gran subida que sufren al abrir más la válvula al 50%, ya que el dosado es muy elevado, por lo que no hay prácticamente presencia de O_2 , lo que dificulta el proceso de oxidación del monóxido de carbono.

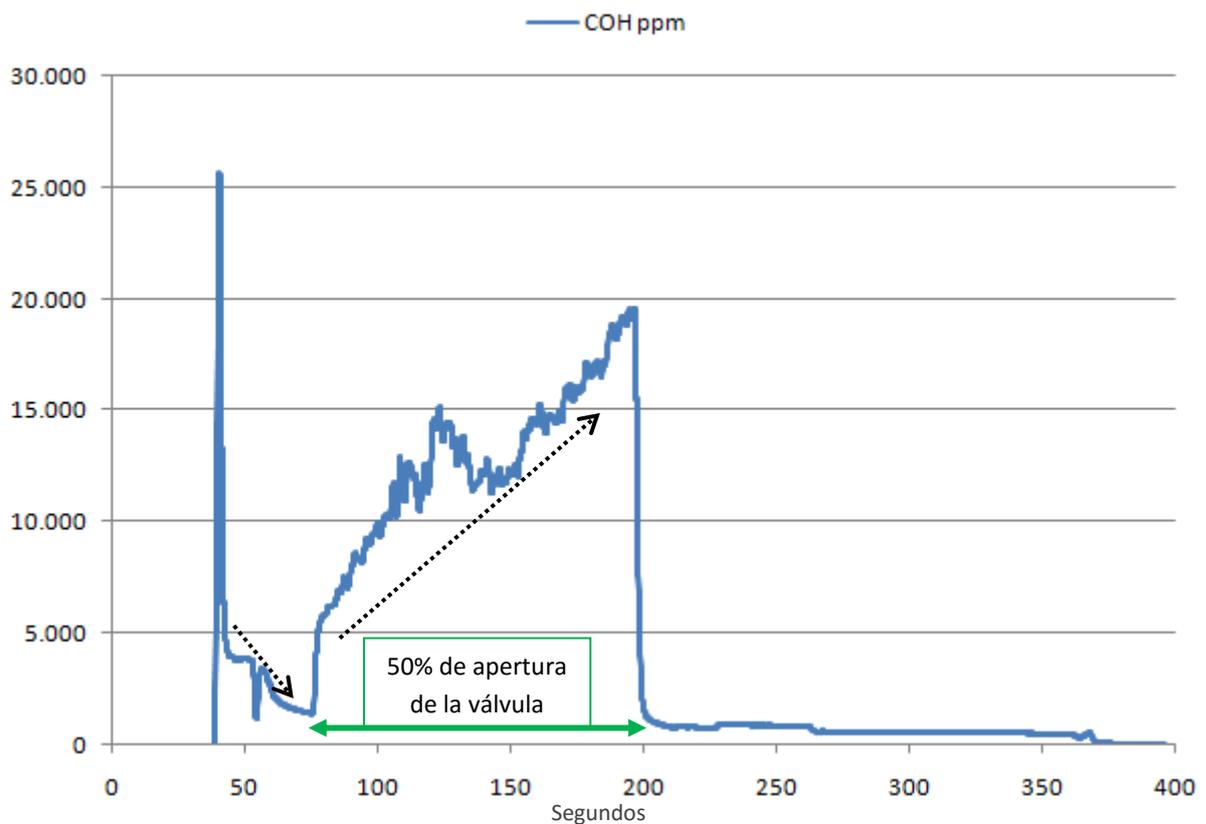
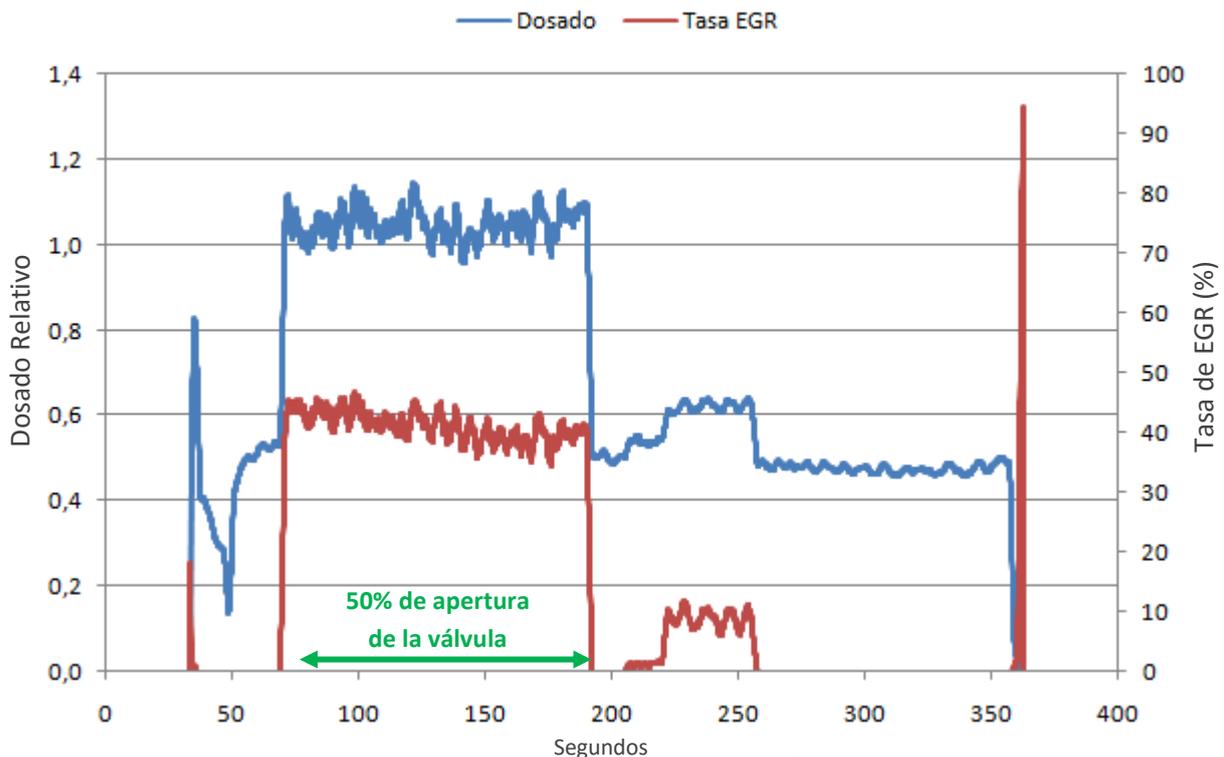


Figura 6.15: CO - EGR(50%)

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

En la siguiente grafica se puede observar el dosado y la tasa de EGR en cada instante, es posible comprobar cómo influye el dosado en el funcionamiento del motor, y que el motor deja de funcionar, se debe valores excesivamente altos de dosado relativo.



En cuanto a tasa de EGR se alcanzan valores de hasta el 45%, en los instantes en los que el grado de apertura es del 50%. Este valor tan elevado es el responsable de que el motor se pare.

6.2.4 ENSAYO CON 35% DE APERTURA DE VÁLVULA DE EGR HP Y NO SWIRL

Por último, al ver que al aplicar una apertura del 50% inicial, el motor literalmente se para, y que con un 30%, los ensayos han salido correctamente, se procederá a ser más exigentes y a aplicar un 35% de apertura inicial de la válvula de EGR de alta presión.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

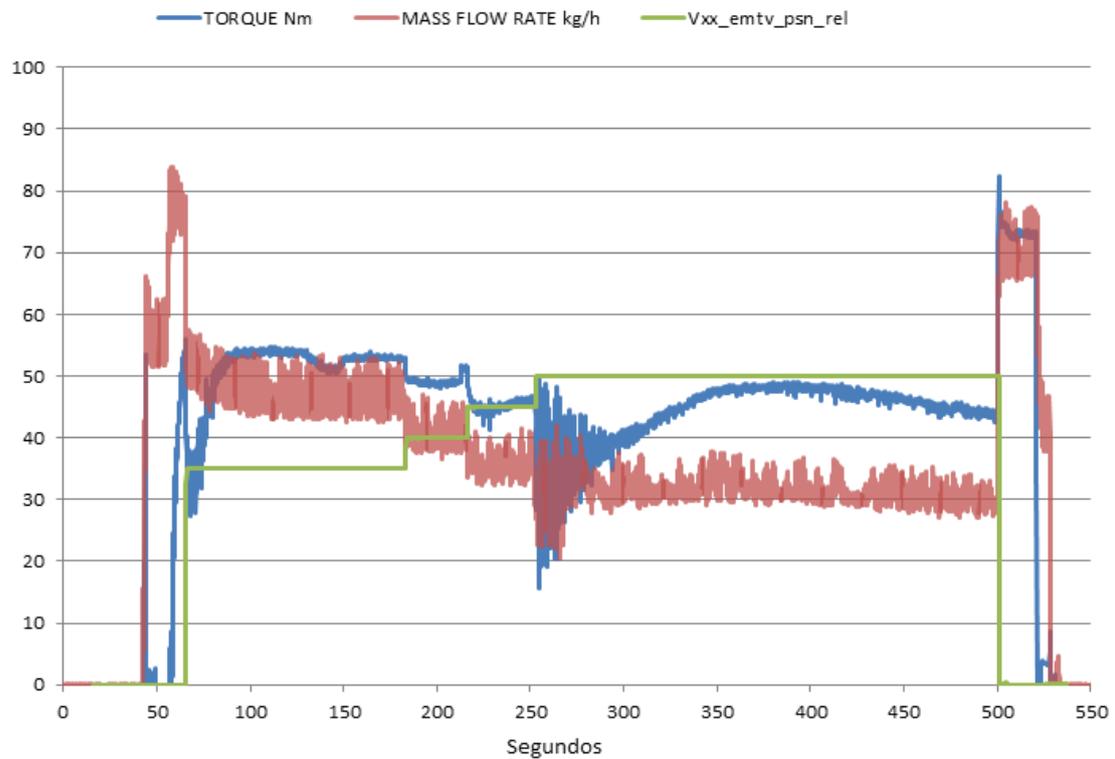


Figura 6.17: Par, Caudal de aire y EGR(35%)

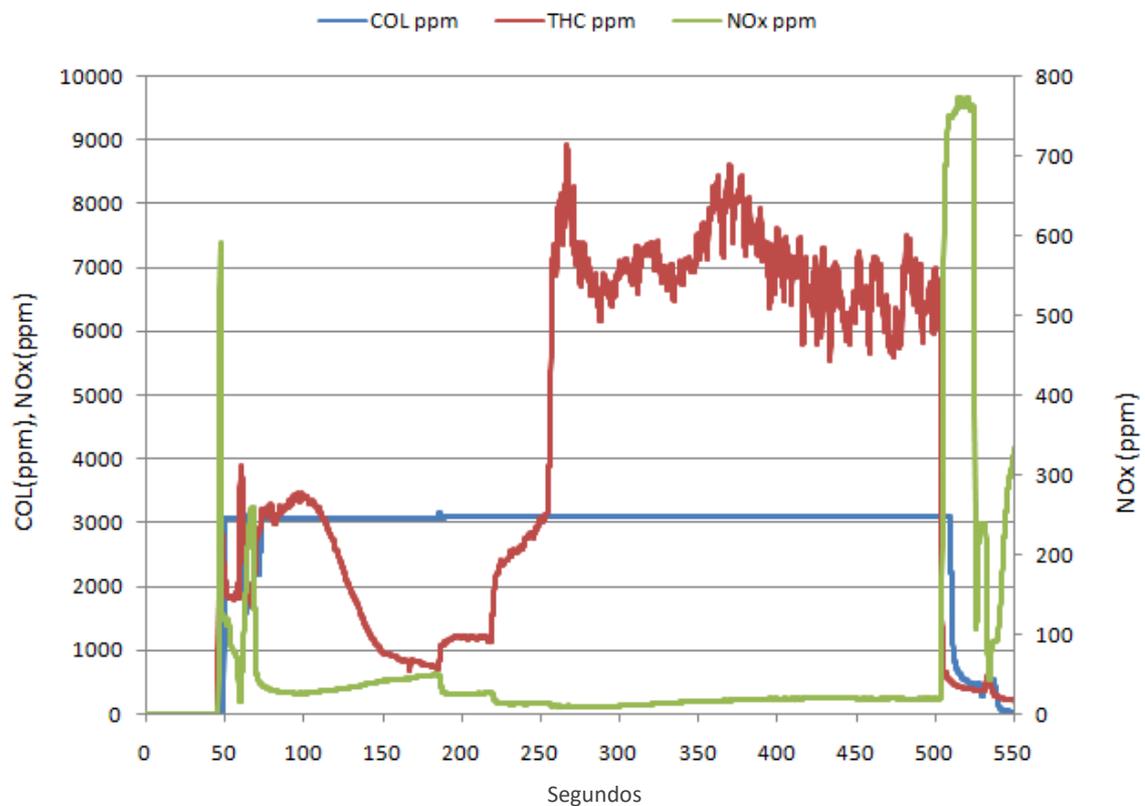


Figura 6.18: Contaminantes EGR(35%)

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

En principio el motor "aguanta", ese valor de apertura del 35% inicial con el que se consigue bajar los NO_x de valores de aproximadamente 600ppm hasta unos valores de 20ppm, descenso más que considerable.

En los valores de CO, como en los ensayos anteriores de 30% inicial de recirculación, primeramente baja, pero cuando se realiza una mayor apertura de la válvula EGR, se produce una notable subida, volviendo a saturar el medido de monóxido de carbono "low", que como se apuntaba anteriormente tenía su límite en un valor de 3142ppm.

Pero si se procede a observar la curva de par, es posible observar valores mínimos de aproximadamente 27Nm al aplicar ese 35% de apertura, y de 17Nm al aplicar por el mayor grado de apertura del 50%. En la siguiente grafica es posible observarlo con mayor nitidez.

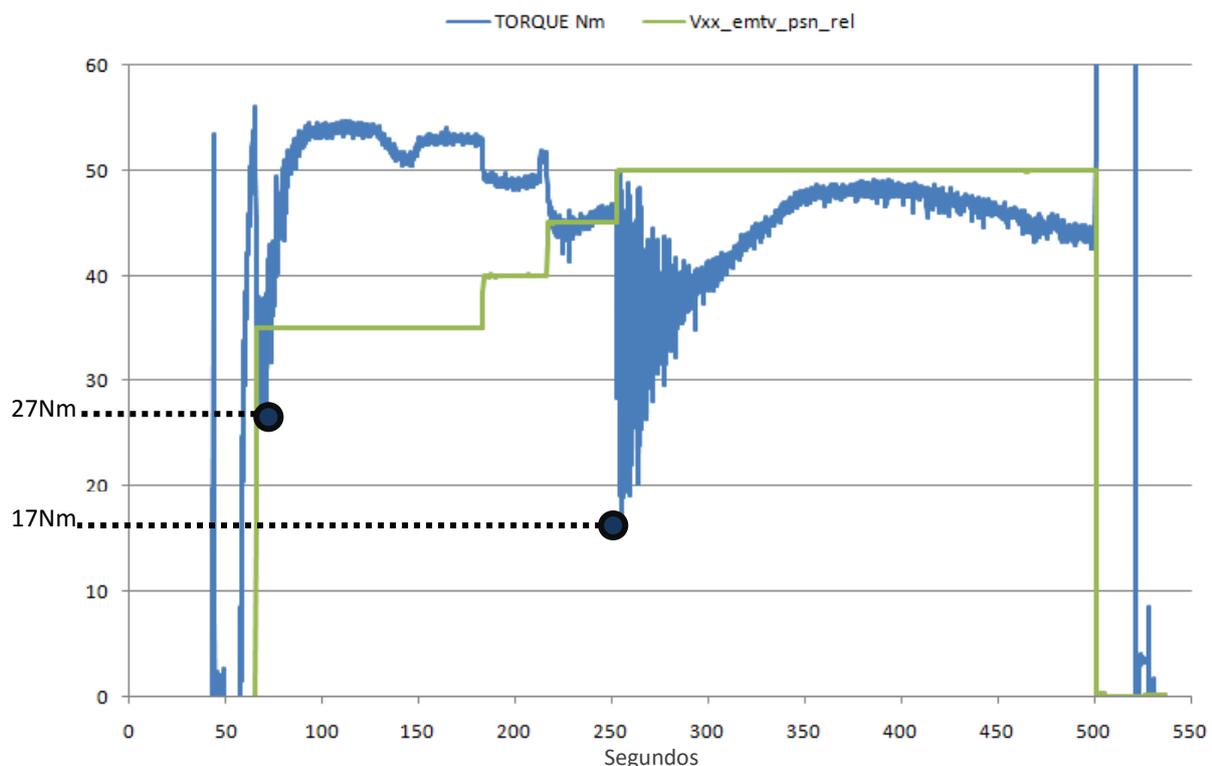


Figura 6.19: Par EGR(35%)

Estos valores de par, son demasiado bajos, los cuales en una conducción real, podrían no ser suficientes, y se produciría el "calado" del automóvil.

En cuanto a los valores de dosado, y de tasa de EGR, se encuentran plasmados en la siguiente gráfica, donde se observa que los valores tan bajos de par, están relacionados con un dosado muy alto, lo que significa que la combustión es incompleta y no se esta "quemando" la totalidad del combustible.

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

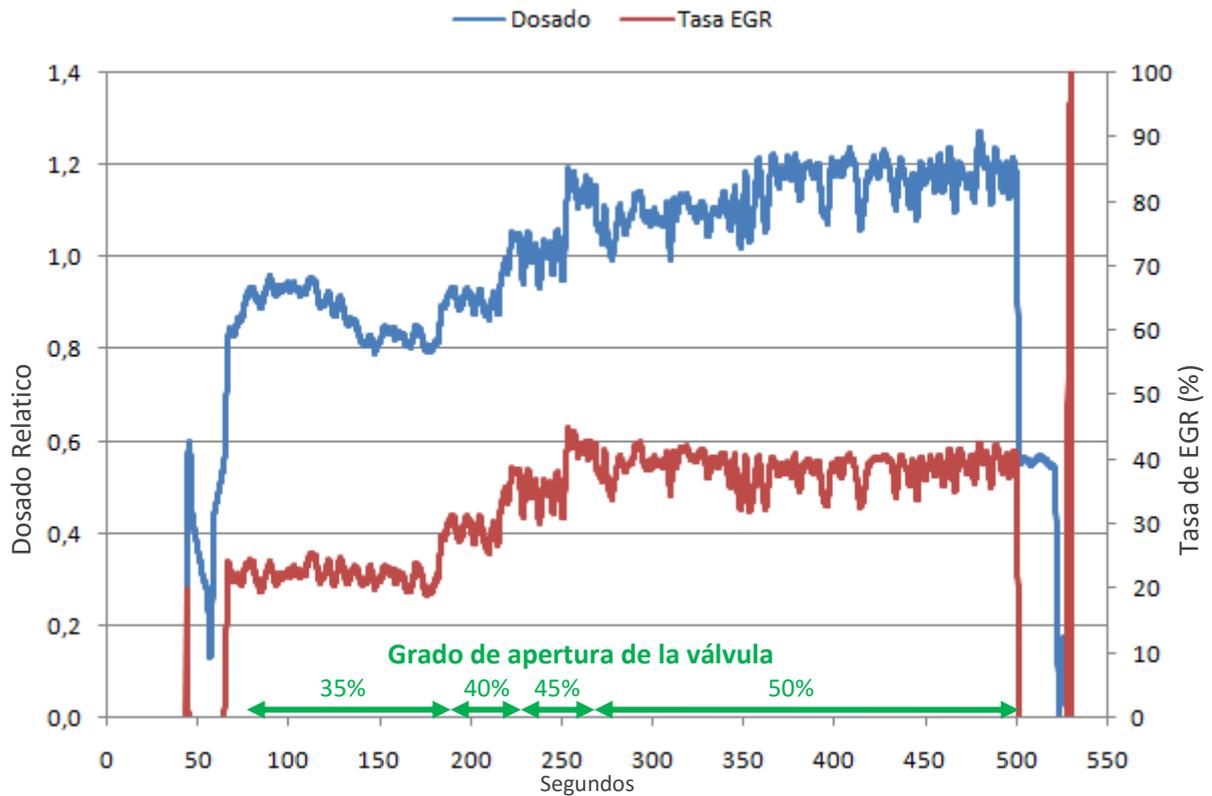


Figura 6.20: Dosado y Tasa de EGR - EGR(35%)

6.3 CONCLUSIONES

Después de realizar los diferentes ensayos se puede concluir que la estrategia óptima, que no comprometa en exceso las prestaciones del motor, ni la mayor emisión de otras sustancias contaminantes, será la de introducir un valor inicial de apertura de la válvula al 30%, el cual corresponde aproximadamente a un valor del 12% de tasa de EGR.

Aproximadamente 100 segundos después, se incrementaría el grado de apertura al 40%, y a partir de aquí no convendría aumentar el grado de apertura ya que comprometería excesivamente las prestaciones del motor, en lo que a potencia y par se refiere.

Esta estrategia corresponde al segundo ensayo realizado, que se vuelve a presentar a continuación.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

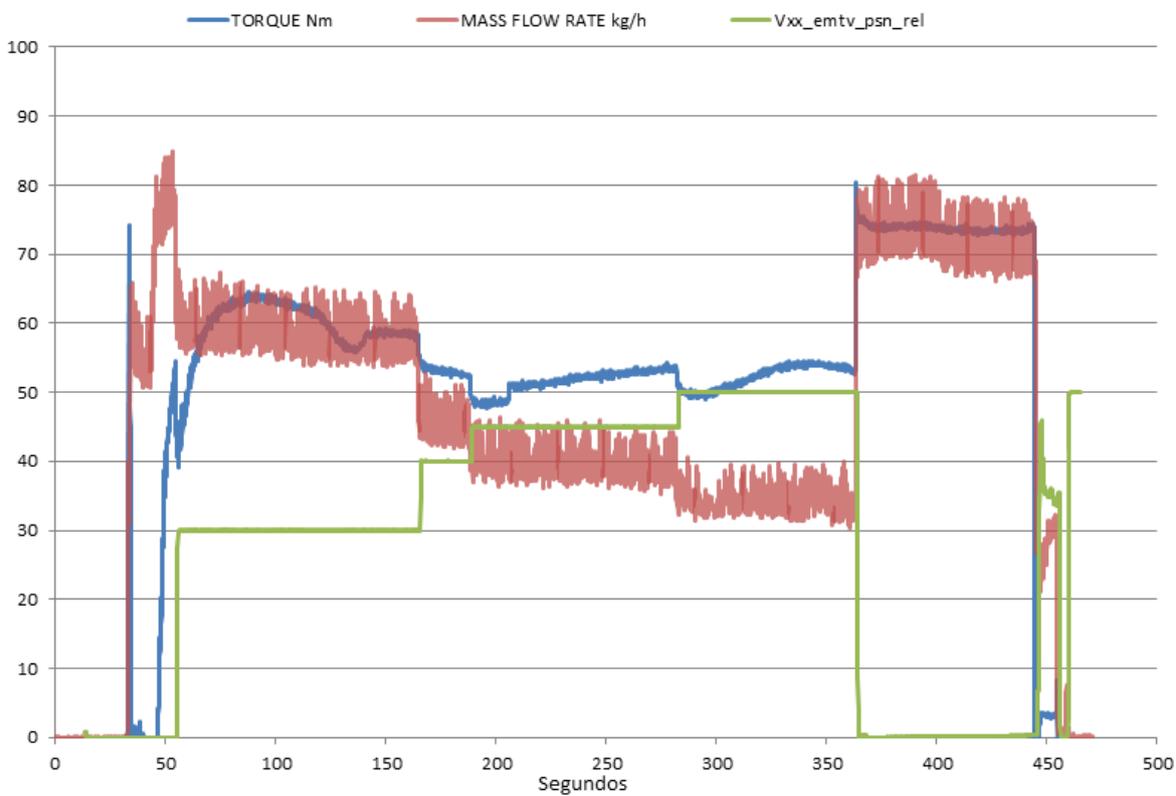


Figura 6.21: Par, Caudal de aire y EGR(30%) con swirl

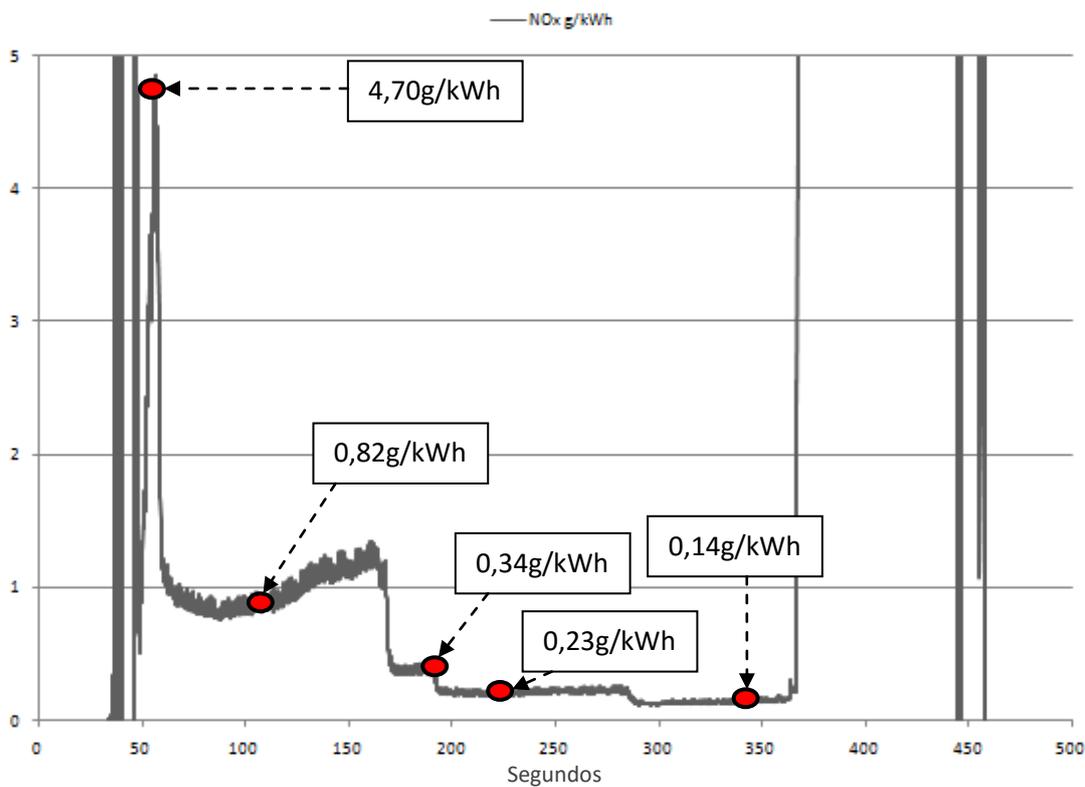


Figura 6.22: NOx/kWh

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

Llevando a cabo esta estrategia, los niveles de NO_x en g/kWh como se ve en la figura 6.22 estarán por debajo de la unidad, reduciendo hasta en seis veces el valor inicial de NO_x al aplicar un 30% de apertura de válvula. Valores, que muestran por si solos la importancia de la recirculación de gases de escape en los motores diésel actuales para cumplir las normativas respecto a contaminación, y más en concreto a lo que óxidos de nitrógeno se refiere.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

BIBLIOGRAFÍA

- Pla Moreno, Benjamín. Análisis del proceso de recirculación de los gases de escape de baja presión en motores diésel sobrealimentados. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 2008.
- Ingeniería térmica : fundamentos de termodinámica. Torregrosa Huguet, Antonio José | Galindo Lucas, José; Climent Puchades, Héctor; Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Máquinas y Motores Térmicos | Valencia : Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, D.L. 2001.
- Motores de combustión interna alternativos. F. Payri, J.M.Desantes
- <http://www.ocio.net/motor/a-fondo-nuevo-motor-diesel-de-renault-r9m-1-6-dci/>
- <http://www.diariomotor.com/tecmovia/2012/07/03/ecu-que-es-y-el-porque-de-su-existencia/>
- **(1)** Zeldovich YB. The oxidation of nitrogen in combustion explosions. Acta Pysichochemica USSR, Vol. 21, pp. 577-628, 1946.

DOCUMENTO II:
PLIEGO DE
CONDICIONES

Realizado por: Fernando Redondo Puelles
Dirigido por: Dr. José Manuel Luján Martínez

CAPÍTULO 1:

CONDICIONES GENERALES

1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se procederá a enumerar una serie de recomendaciones, con el fin de garantizar la seguridad y salvaguardar la integridad de cada uno de los usuarios que se encuentran en la sala durante los diferentes ensayos.

La sala de ensayos puede resultar un entorno de trabajo con determinados riesgos, sobre todo si no se guardan las pertinentes precauciones a la hora de trabajar en ella. Se trata de un instalación, en la que se encuentran albergados líquidos inflamables, posibles gases tóxicos procedentes de la combustión del motor, y también una instalación eléctrica bastante compleja.

Otro punto a tener en cuenta, es que el motor con el que se han realizado los ensayos, está destinado para ser usado en un automóvil, y no para estar en una bancada de una sala de ensayos. Esto podría producir el fallo de algún componente.

A continuación se han dividido las condiciones para realizar correctamente los ensayos en tres:

- Condiciones a cumplir por la sala.
- Condiciones a cumplir en la instalación.
- Normativa para los operadores.

2. CONDICIONES A CUMPLIR POR LA SALA

- Perfecto funcionamiento de los diferentes sistemas de seguridad, como los sistemas de detección de gases y de incendios.
- La estructura de la sala deberá ser completamente al resto del edificio de manera que no se transmitan las posibles vibraciones producidas por el motor.
- La instalación deberá estar equipada por los pertinentes extintores, que sean adecuados para extinguir fuegos de origen eléctrico o el producido por hidrocarburos. Estos extintores deberán estar señalizados y colocados en un lugar de fácil acceso para poder realizar una rápida actuación en caso de incendio.
- El depósito de combustible deberá estar alejado del motor.
- Iluminación adecuada.

3. CONDICIONES A CUMPLIR EN LA INSTALACIÓN

- La instalación eléctrica debe estar provista de los diferentes sistemas de seguridad necesarios, contra sobre intensidades o fugas y todos los sistemas eléctricos, deberán tener conexión a tierra para evitar posibles fugas eléctricas.
- La transmisión que conecta el cigüeñal y el freno debe estar correctamente protegida, para evitar que algún elemento pueda salir despedido en el caso de que se produjese alguna rotura.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

- Cada uno de los componentes de la instalación deben tener perfecto acceso sin peligro de lesión a causa de otras piezas, es decir, se ha de asegurar una accesibilidad rápida y segura.
- En el puesto de trabajo ha de haber instalada una pulsador de emergencia que detenga el funcionamiento de todos los elementos de la sala, en caso de fallo.

4. NORMATIVA PARA LOS OPERADORES

Para la perfecta realización de los diferentes ensayos los operadores deberán llevar a cabo las siguientes pautas:

- Conectar previamente al inicio de los ensayos el sistema de extracción de la sala y asegurarse de su perfecto funcionamiento
- Evitar derrames de aceite y combustible, y limpiarlos inmediatamente en caso de tal hecho.
- Ensayar siempre con la puerta donde se encuentra el motor completamente cerrada, estando absolutamente prohibido el acceso a tal sala durante el desarrollo de los ensayos.
- Las operaciones que se realicen en el motor serán llevadas a cabo por el personal adecuado, que deberá ir previsto de los medios de protección necesarios, como calzado reforzado, guantes, protección ocular etc.
- El laboratorio deberá estar provisto de medios necesarios para tratar lesiones de carácter leve, en el caso de lesiones de mayor gravedad se deberá acudir inmediatamente al servicio sanitario pertinente.

DOCUMENTO III: **PRESUPUESTO**

Realizado por: Fernando Redondo Puelles

Dirigido por: Dr. José Manuel Luján Martínez

CAPÍTULO 1:

PRESUPUESTO

1. INTRODUCCIÓN

En el presente documento se procede al desglose de los costes de las diferentes partidas, hasta obtener la cuantía total del proyecto.

Para la realización de este presupuesto se ha tenido en cuenta, equipos instalados en la sala, maquinaria utilizada, materiales utilizados, así como cantidad de mano de obra necesaria y aportada por cada especialista.

En el presupuesto de este trabajo final de grado, no se ha añadido, el coste relativo al motor, ya que ha sido suministrado a través del convenio que existe entre la Universidad Politécnica de Valencia, Valeo y Renault, ni el coste del intercooler, que ha sido suministrado por Valeo.

Tampoco se ha tenido en cuenta, el coste del montaje del motor en la sala, ni de los diferentes sistemas de medición y control. Tampoco se considerara el coste de la construcción de la sala.

2. SALARIO DE LOS TRABAJADORES

Para la realización del proyecto, que engloba desde los diferentes ensayos realizados, hasta la tarea de evaluación, síntesis y conclusiones de los resultados obtenidos, ha sido necesario disponer de un técnico de laboratorio en primer lugar, y de un titulado en Ingeniería en Tecnologías Industriales.

- Técnico de laboratorio: 30€/h.
- Ingeniero Industrial: 65€/h.

3. COSTE DE LOS EQUIPOS

Para la realización de los ensayos se han tenido en cuenta el coste de los siguientes equipos:

- Analizador de contaminantes HORIBA.
- Conjunto freno dinamométrico DYNAS.
- Medidor de caudal Sensy-flow.
- Dos ordenadores de sobremesa.
- Sistema de climatización industrial de 18 Kw.

Para posteriormente calcular el presupuesto total, se calculará el precio por hora de cada uno de ellos. Para dicho cálculo, lo que representa la amortización de cada equipo, se ha utilizado la fórmula(7.1) que se presenta a continuación:

$$\frac{\text{€}}{\text{hora}} = \frac{\text{COSTE}}{\text{AÑOS DE VIDA UTIL * HORAS AL AÑO}} \quad (7.1)$$

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

	Coste (€)	Vida útil (años)	Horas al año (h)	(€/h)
Analizador de contaminantes HORIBA	271.000,00	10	400	67,75
Conjunto freno dinamométrico DYNAS	155.000,00	10	400	38,75
Medidor de caudal Sensy-flow	25.000,00	10	400	6,25
Dos ordenadores de sobremesa	1.640,00	4	400	1,025
Sistema de climatización industrial	32.000,00	10	400	8

Tabla 8.1: Equipos

4. COSTE DE MATERIALES Y RECURSOS ENERGÉTICOS

En el presente apartado se ha tenido en cuenta la cuantía destinada a los diferentes materiales y recursos energéticos que han sido utilizados en el proyecto.

- Filtro de aceite: 20.90€.
- Filtro de aire: 19.40€.
- Filtro de combustible: 55.10€.
- Aceite 5W40: 10.80€/l.
- Batería: 92.00€.
- Combustible: 0.90 €/l.
- Energía eléctrica: 0.105€/kWh.

5. PRESUPUESTO

En la siguiente tabla se presenta el desglose total del presupuesto para la realización del presente proyecto.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.

PRESUPUESTO						
MANO DE OBRA		Cantidad (h)	Precio (€/h)	Importe (€)	IVA(21%)	IMPORTE TOTAL(€)
	Técnico de laboratorio	40,00	30,00	1.200,00	252,00	1.452,00
	Ingeniero Industrial	60,00	65,00	3.900,00	819,00	4.719,00
Total Mano de obra				5.100,00	1.071,00	6.171,00
EQUIPOS		Cantidad (h)	Precio (€/h)	Importe (€)	IVA(21%)	IMPORTE TOTAL(€)
	Analizador de contaminantes HORIBA	35	67,75	2.371,25	497,96	2.869,21
	Conjunto freno dinamométrico DYNAS	35	38,75	1.356,25	284,81	1.641,06
	Medidor de caudal Sensy-flow.	35	6,25	218,75	45,94	264,69
	Dos ordenadores de sobremesa	50	1,025	51,25	10,76	62,01
	Sistema de climatización industrial	70	8	560,00	117,60	677,60
Total equipos				4.557,50	957,08	5.514,58
MATERIALES Y RECURSOS ENERGÉTICOS		Cantidad	Precio	Importe(€)	IVA(21%)	IMPORTE TOTAL(€)
	Filtro de aceite MAHLE OX389/1D	1	20,90	20,90	4,39	25,29
	Filtro de aire MAHLE LX1748	1	19,40	19,40	4,07	23,47
	Filtro de combustible MAHLE KL485	1	55,10	55,10	11,57	66,67
	Aceite Cepsa 5W40	5 (litros)	10,80€/l	54,00	11,34	65,34
	Batería EXIDE EC700	1	92,00	92,00	19,32	111,32
	Combustible(gasoil)	100 (litros)	0,90€/l	90,00	18,90	108,90
	Energía Eléctrica	9400kWh	0,105€/kWh	987,00	207,27	1.194,27
Total materiales y recursos energéticos				1.318,40	276,86	1.595,26
Importe						10.975,90 €
IVA (21%)						2.304,94 €
TOTAL						13.280,84 €

Tabla 8.2: Presupuesto

Por tanto el montante total del presupuesto asciende a la cifra de "trece mil doscientos ochenta euros con ochenta y cuatro céntimos", de los cuales:

- **6.170,00€** son destinado a recursos humanos.
- **5.514,58€** son destinados a coste de los equipos utilizados.
- **1.595,26** destinados a materiales y recursos energéticos.

De los **13.280,84€**, el 21% del importe total, unos **2.304,94€** pertenecen al IVA.

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Estudio paramétrico experimental, para la determinación de la temperatura óptima de activación del sistema de recirculación de gases en un motor diésel EURO6 de automoción.
