



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

CARACTERIZACIÓN DE LA REGENERACIÓN ACTIVA DE FILTROS DE PARTÍCULAS DIESEL DE FLUJO DE PARED A ELEVADA ALTITUD DE CONDUCCIÓN

AUTOR: CRISTIAN GARCÍA VENTURA

TUTOR: ROBERTO NAVARRO GARCÍA

COTUTOR: PEDRO PIQUERAS CABRERA

Curso Académico: 2019-20

RESUMEN

En este trabajo se lleva a cabo la caracterización del proceso de regeneración del filtro de partículas de un motor Diesel de Renault, el K9K EURO6d-temp.

Para ello, se ha tenido en cuenta el impacto del aumento de la altitud de conducción sobre la tasa de oxidación del hollín durante la regeneración activa del DPF; ya que, las últimas directrices de la legislación europea de emisiones contaminantes lo requieren, pues obligan a realizar ensayos de validación en condiciones de altitud y temperatura cada vez más extremas.

El estudio realizado combina el análisis de resultados experimentales con simulaciones de un modelo de regeneración del DPF, cuya calibración ha sido realizada en base a los ensayos previos.

Gracias a las evidencias proporcionadas por ambas herramientas, se han definido las etapas de la regeneración, y se ha estudiado el efecto de la caída de presión inicial del filtro sobre la regeneración.

Además, se han hipotetizado las causas que determinan la variación de la tasa de oxidación de hollín a medida que aumenta la altura de conducción, y dichas hipótesis se han corroborado mediante simulaciones realizadas por el modelo del sistema.

Finalmente, a través del presupuesto, se ha determinado el coste total del estudio en 39.556,51 €.

Palabras clave: emisiones; motor de combustión interna alternativo; filtro de partículas Diesel; hollín; regeneración; altitud; modelado.

RESUM

En aquest treball es duu a terme la caracterització del procés de regeneració del filtre de partícules d'un motor Dièsel de Renault, el K9K EURO6d-temp.

Per a fer-ho, s'ha tingut en compte l'impacte de l'augment de l'altitud de conducció sobre la taxa d'oxidació del sutge durant la regeneració activa del DPF; ja que, les últimes directrius de la legislació europea d'emissions contaminants ho requereixen, doncs obliguen a realitzar assajos de validació en condicions d'altitud i temperatura cada cop més extremes.

L'estudi realitzat combina l'anàlisi de resultats experimentals amb simulacions d'un model de regeneració del DPF, el qual ha estat calibrat mitjançant els assajos previs.

Gràcies a les evidències proporcionades per totes dues eines, s'han definit les etapes de la regeneració, i s'ha estudiat l'efecte de la caiguda de pressió inicial del filtre sobre la regeneració.

A més, s'han tret hipòtesis de les causes que determinen la variació de la taxa d'oxidació de sutge a mesura que augmenta l'altura de conducció, i aquestes hipòtesis han estat corroborades mitjançant simulacions realitzades pel model del sistema.

Finalment, mitjançant el pressupost, s'ha determinat el cost total de l'estudi en 39.556,51 €.

Paraules clau: Emissions; Motor de combustió interna alternatiu; filtre de partícules; sutge; regeneració; altitud; modelatge.

ABSTRACT

This project consists in the characterization of the regeneration process in a particle filter of a Renault Diesel engine, the K9K EURO6d-temp.

For this purpose, the study takes into consideration the effect of increasing the driving altitude on the soot oxidation rate during the DPF active regeneration; since the latest guidelines of European legislation on polluting emissions require this, as they make it necessary to carry out validation tests under the extreme increase of altitude and temperature conditions.

The study combines the analysis of experimental results with DPF regeneration model simulations, the calibration of which has been based on the previous tests.

According to the evidence provided by both tools, the stages of regeneration have been defined, and the effect of the initial pressure drop of the filter on regeneration has been studied.

In addition, the causes that determine the variation of the soot oxidation rate as the conduction height increasement have been hypothesized, and these hypotheses have been corroborated by means of simulations carried out by the system model.

Finally, through the budget, the total cost of the study has been determined at 39,556.51 €.

Keywords: emissions; alternative internal combustion engine; Diesel particle filter; soot; regeneration; altitude; modelling.

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- Memoria
- Presupuesto

ÍNDICE DE LA MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Preámbulo	2
1.2. Motivaciones.....	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Metas globales	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Estructura del trabajo	3
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. MCI A.....	5
2.1.1. Motor de encendido por compresión	6
2.1.2. Motor de encendido provocado	6
2.2. Emisiones contaminantes	6
2.2.1. Tipos de emisiones	7
2.2.2. Normativa europea	9
2.3. Estrategias para reducir las emisiones.....	11
2.3.1. Estrategias activas	12
2.3.2. Estrategias pasivas: Sistemas de postratamiento	12
2.3.2.1. DPF	14
2.3.2.1.1. Regeneración activa.....	15
2.3.2.1.2. Regeneración pasiva.....	16
3. ENSAYOS DE REGENERACIÓN DEL DPF A DIFERENTES ALTITUDES.....	17
3.1. Descripción de la sala de ensayos	17
3.2. Metodología de ensayos	20
3.2.1. Estrategia de inyección.....	21
3.3. Herramientas de postprocesado de datos.....	21

4. MODELO DEL DPF.....	23
4.1. Fundamento teórico del modelo de regeneración del DPF	23
4.2. Calibración del modelo	27
5. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	29
5.1. Fases de la regeneración	29
5.2. Aumento de la caída de presión del DPF	30
5.3. Incremento de la altitud	31
5.3.1. 1300 metros	32
5.3.2. 2500 metros	34
6. CAUSAS DE LA RALENTIZACIÓN DE LA REGENERACIÓN CON EL AUMENTO DE LA ALTITUD.....	37
6.1. Efecto de la presión parcial del O2	38
6.2. Efecto de la temperatura del O2	40
6.3. Efecto combinado de la presión parcial y la temperatura.....	41
7. RESUMEN Y CONCLUSIONES	44
8. BIBLIOGRAFÍA	46

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1. CONSIDERACIONES PREVIAS	51
1.1. Introducción	51
1.2. Recursos humanos	51
1.3. Bienes amortizables	52
1.4. Definición de las unidades de obra	52
1.4.1. Actividades previas.....	52
1.4.2. Desarrollo de la metodología	53
1.4.3. Redacción del trabajo de final de grado	53
1.4.4. Unidades adicionales.....	53
2. DESGLOSE DEL PRESUPUESTO Y PRESENTACIÓN DE DOCUMENTOS	54
2.1. Justificación de precios: Mano de obra	55
2.2. Justificación de precios: Bienes amortizables	56
2.3. Justificación de precios: Unidades de obra.....	57

2.4. Cuadro de precios nº1.....	61
2.5. Cuadro de precios nº2.....	62
2.6. Mediciones.....	63
2.7. Presupuestos parciales.....	67
2.8. Resumen del presupuesto	71

OTROS ÍNDICES

Índice de figuras

Figura 1. Esquema básico de un MCIA [2]	5
Figura 2. Procesos elementales de un motor de 4T como el K9K EURO6d-temp [1]	5
Figura 3. Esquema de formación de las partículas primarias del sustrato [5]	7
Figura 4. Evolución de los límites de emisiones contaminantes a lo largo de los años según las normativas europeas [12]	9
Figura 5. Etiqueta E10 [14]	10
Figura 6. Etiqueta B7 [14]	10
Figura 7. Velocidad de un vehículo de clase 3b en un ensayo WLTP [15]	10
Figura 8. Esquema de un DOC y de las reacciones principales que acontecen en él [20]	13
Figura 9. Esquema de un SCR y de las reacciones principales que acontecen en él [20]	13
Figura 10. Esquema de un LNT y de las reacciones principales que acontecen en él [20]	14
Figura 11. Regímenes de funcionamiento de un DPF de flujo de pared [23]	14
Figura 12. Pérdida de presión y eficiencia de filtrado del DPF a medida que aumenta la masa de hollín retenida [25]	15
Figura 13. Salas de ensayos	19
Figura 14. Perfiles de inyección	21
Figura 15. Emisiones de CO y par del motor a lo largo del tiempo antes y después de ser puestos en fase	22
Figura 16. Derivada de la caída de presión del DPF antes y después de eliminarse el ruido de su señal	22
Figura 17. Esquema nodal del submodelo térmico	26
Figura 18. Temperatura: 0m – 12000Pa	29
Figura 19. Carga másica estimada por el modelo: 0m – 12000Pa	29
Figura 20. Caída de presión: 0m – 12000Pa	29
Figura 21. Derivada de la caída de presión calculada con datos experimentales: 0m – 12000Pa	29
Figura 22. Evolución de la caída de presión en los ensayos de 0m	30
Figura 23. Derivada de la caída de presión calculada con datos experimentales: 0m – 15000Pa	31

Figura 24. Derivada de la caída de presión calculada con datos experimentales: 0m – 22500Pa.....	31
Figura 25. Caída de presión medida en el ensayo: 1300m – 12000Pa.....	32
Figura 26. Caída de presión medida en el ensayo: 1300m – 15000Pa.....	32
Figura 27. Caída de presión medida en el ensayo: 1300m – 22500Pa.....	33
Figura 28. Derivada de la caída de presión calculada con los datos experimentales de 1300m.....	33
Figura 29. Caída de presión medida en el ensayo: 2500m – 12000Pa.....	34
Figura 30. Caída de presión medida en el ensayo: 2500m – 15000Pa.....	35
Figura 31. Caída de presión medida en el ensayo: 2500m – 22500Pa.....	35
Figura 32. Derivada de la caída de presión calculada con datos experimentales de 2500m.	35
Figura 33. Recubrimiento superficial del O2 en los ensayos.....	37
Figura 34. Recubrimiento superficial del O2 en los ensayos si la presión parcial en 1300m y 2500m fuese la misma que en 0m	37
Figura 35. Recubrimiento superficial del O2 en los ensayos si el perfil de temperatura a la entrada del DPF en 1300 y 2500m fuese el mismo que en 0m.....	38
Figura 36. Presión parcial del O2 en los ensayos	38
Figura 37. Efecto de la presión parcial del O2 en la caída de presión a 1300m.....	39
Figura 38. Efecto de la presión parcial del O2 en la caída de presión a 2500m.....	39
Figura 39. Perfiles de temperatura a 0m.....	40
Figura 40. Perfiles de temperatura a 1300m	40
Figura 41. Perfiles de temperatura a 2500m	40
Figura 42. Efecto de la temperatura en la caída de presión a 1300m	41
Figura 43. Efecto de la temperatura en la caída de presión a 2500m	41
Figura 44. Comparación del efecto de la presión parcial y de la temperatura en la caída de presión a 1300m.....	42
Figura 45. Comparación del efecto de la presión parcial y de la temperatura en la caída de presión a 2500m.....	42
Figura 46. Caída de presión al incrementar la carga inicial en los ensayos de 0m	44
Figura 47. Derivada de la caída de presión al aumentar la carga inicial en los ensayos de 0m.....	44

Índice de tablas

Tabla 1. Límites de emisiones contaminantes según las últimas normativas europeas [13] ..	9
Tabla 2. Ciclos WLTC en función de la potencia específica y la velocidad máxima [13]	10
Tabla 3. Duraciones de los ciclos WLTC en un ensayo de clase 3b [13]	10
Tabla 4. Características de las diferentes fases de un ensayo RDE [13].....	11
Tabla 5. Factores correctores de las emisiones en los ensayos RDE [13]	11
Tabla 6. Especificaciones del motor K9K Euro6d-Temp	17
Tabla 7. Especificaciones del DOC.....	18
Tabla 8. Especificaciones del DPF	18
Tabla 9. Rangos de trabajo del MEDAS, el MTM y el MHM	19
Tabla 10. Condiciones de contorno de los ensayos	20
Tabla 11. Condiciones de presión y carga de los diferentes ensayos	20
Tabla 12. Cantidad y ángulo de inyección	21
Tabla 13. Parámetros de oxidación	27
Tabla 14. Coeficientes del factor de forma	27
Tabla 15. Temperatura inicial de la pared porosa y de la capa de partículas	28
Tabla 16. Otros parámetros geométricos y térmicos.....	28
Tabla 17. Duración de las etapas de la regeneración en los ensayos de 0m	31
Tabla 18. Diferencia entre la caída de presión inicial y final en los ensayos de 0m	31
Tabla 19. Duración de las etapas de la regeneración en los ensayos de 0m y 1300m	33
Tabla 20. Tiempo total de ensayo y caída de presión inicial. Final y máxima en los ensayos de 0m y 1300m.....	34
Tabla 21. Duración de las etapas de la regeneración en los ensayos de 0, 1300 y 2500m....	36
Tabla 22. Tiempo total de ensayo y caída de presión inicial, final y máxima en los ensayos de 0m, 1300m y 2500m.....	36
Tabla 23. Duración de las etapas de la regeneración en los ensayos de 0m	44
Tabla 24. Tiempo total de ensayo en los ensayos de 0m, 1300m y 2500m.....	45
Tabla 25. Temperatura de los gases a la entrada del DPF.....	45

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Reacción de oxidación del carbono con el oxígeno	23
Ecuación 2. Ecuación del transporte convectivo del O ₂	23
Ecuación 3. Ecuación del transporte convectivo del O ₂	24
Ecuación 4. Velocidad de filtrado del DPF	24
Ecuación 5. Ecuación de Arrhenius	24
Ecuación 6. Recubrimiento superficial del O ₂	24
Ecuación 7. Cálculo de la constante de equilibrio de la adsorción	24
Ecuación 8. Pérdida de presión en el DPF	24
Ecuación 9. Caída de presión en el DPF por causas inerciales	24
Ecuación 10. Caída de presión en el DPF por fricción	25
Ecuación 11. Caída de presión en el DPF por la ley de Darcy.....	25
Ecuación 12. Integración de la ley de Darcy en la capa de partículas.....	25
Ecuación 13. Diámetro medio del poro del DPF	25
Ecuación 14. Porosidad del DPF	25
Ecuación 15. Diámetro de cada celda del DPF	25
Ecuación 16. Masa a la cual se saturan las celdas del DPF.....	25
Ecuación 17. Factor de forma.....	26
Ecuación 18. Factor de densidad del hollín.....	26
Ecuación 19. Ecuación del transporte convectivo del O ₂	39

Índice de símbolos de la memoria

Símbolos latinos

a_i	Constantes del factor de forma
A_{O_2}	Factor pre-exponencial de la reacción de oxidación del hollín
A_f	Área de filtrado del monolito
$A_{s_{O_2}}$	Factor pre-exponencial del proceso de adsorción del O_2
C	Capacidad térmica equivalente
d_c	Diámetro de unidad colectora
d_{cell}	Diámetro de una celda
d_p	Diámetro de poro medio
EA	Energía de activación
F	Coefficiente de fricción
H	Entalpía de la adsorción
k_{O_2}	Constante cinética de la reacción de oxidación del hollín
k	Permeabilidad
$k_{s_{O_2}}$	Constante de equilibrio de la adsorción
L	Longitud
m	Masa
M	Masa molecular
\bar{M}	Masa molecular promedio
p	Presión
Q	Caudal volumétrico
R	Resistencia térmica equivalente
\mathcal{R}	Constante universal de los gases
S_p	Superficie específica del hollín
T	Temperatura

u_w	Velocidad de filtrado
V	Volumen
w	Espesor
X	Fracción molar
Y	Fracción másica
z	Coordenada en la dirección perpendicular al medio poroso

Símbolos griegos

α	Lado del canal
α_{O_2}	Ratio de oxidación del O ₂
ε	Porosidad
μ	Viscosidad dinámica del gas
ρ	Densidad
σ	Densidad de la celda
ζ_t	Coefficiente de pérdida de presión inercial
Φ_{ps}	Factor de densidad del hollín
ψ	Coefficiente de fricción
θ	Recubrimiento superficial
$\dot{\omega}$	Ratio de reacción

Subíndices

ash	Referente a la capa de cenizas
ax	Axial
c	Conducción
Darcy	Referente a la ley de Darcy
DPF	Referente al filtro de partículas Diésel
ef	Efectivo
ext	Externo
fr	Referente a la fricción

gas	Referente al flujo de gases de escape
in	Propio del canal de entrada
inercial	Referente a las causas inerciales
int	interno
O2	Referente al O2
out	Propio del canal de salida
pl	Referente a la capa de partículas
post	Aguas abajo del monolito
pre	Aguas arriba del monolito
rad	Radial
s	Referente al hollín
sp	Referente a la penetración del hollín en la pared porosa
sur	superficial
w	Referente a la pared porosa del sustrato

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Preámbulo

A mediados del siglo XIX el petróleo comenzó a producirse de manera comercial, este hito histórico dio paso a la creación de diversos motores que permitían convertir esa fuente de energía primaria en otras formas de energía más útiles para el ser humano. Así pues, en el año 1876, Nikolaus August Otto creó el primer motor de cuatro tiempos alimentado con gasolina; esto asentó las bases para los motores de combustión interna alternativos (MCI), los cuales durante años focalizaron su evolución en la mejora de sus prestaciones hasta convertirse en el medio de propulsión terrestre más utilizado.

Sin embargo, la masificación de los MCI también supuso un aumento de las emisiones contaminantes a causa de la combustión de la gasolina y el diésel, proceso que genera compuestos como las partículas en suspensión, el dióxido de carbono (CO₂), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de azufre (SO_x), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los hidrocarburos sin quemar (HC) entre otros. Todos estos contaminantes son peligrosos para el ser humano y el planeta, produciendo efectos diversos como la lluvia ácida, el aumento del efecto invernadero, problemas respiratorios, etc. Este tipo de problemáticas medioambientales, causadas por el transporte, comenzaron a hacerse visibles en el mundo por primera vez en 1943 en Los Ángeles, cuando, debido a la combinación de los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO), el metano (CH₄) y otros compuestos orgánicos volátiles procedentes del escape de los vehículos, se generó un gran smog fotoquímico.

En Europa, para reducir estas emisiones contaminantes, se creó la normativa Euro, un conjunto de directivas que regulan las emisiones de los automóviles de los estados miembros de la Unión Europea, y que han ido haciéndose cada vez más restrictivas a lo largo de los años. Actualmente, tras continuas limitaciones de los valores de emisiones admisibles, se encuentra vigente la EURO 6.

Ante esta tesitura, los vehículos se han visto en la obligación de implementar diversos sistemas de postratamiento en el escape que permiten el control de las emisiones. Entre estos sistemas destacan: el catalizador de oxidación Diesel (DOC), que oxida las partículas de CO y de HC; el filtro de partículas Diesel (DPF), que retiene las partículas de hollín mediante una estructura porosa tipo panel; el reductor catalítico selectivo (SCR), que reduce los óxidos de nitrógeno; y la trampa de NO_x (LNT), la cual es ideal para motores de pequeña cilindrada, ya que reduce los NO_x y oxida el CO y el HC, aunque con rendimientos menores al del resto de sistemas de postratamiento.

1.2. Motivaciones

Ante el endurecimiento incesante de la legislación de emisiones contaminantes, han aparecido nuevas directrices que obligan a realizar ensayos de validación en diferentes condiciones de altitud y temperatura. Este hecho motiva a realizar pruebas en laboratorios de altitud, modelar estos comportamientos, estudiar el efecto de este parámetro en la emisión de contaminantes e intentar paliar sus consecuencias negativas. Todas estas actividades permiten conocer y controlar la contaminación de los MCI ante estas condiciones de contorno, y así, adaptarse a las nuevas normativas vigentes en la Unión Europea (apartado 2.2.2).

En concreto, el presente estudio forma parte de un proyecto del CMT: Motores Térmicos de la Universitat Politècnica de València (UPV), un centro de educación e investigación de más de cuarenta años de experiencia, cuya actividad abarca desde el estudio de los procesos fisicoquímicos que están involucrados en el funcionamiento de los MCIAs, hasta otro tipo de problemáticas que atañen a la industria automovilística. Además, el CMT no solo consta de investigadores, técnicos, asistentes de investigación y un personal de administración, sino que también sirve de centro de formación para muchos estudiantes en su realización de trabajos de final de grado y máster (TFG y TFM), y tesis doctorales.

Conocida la importante labor del CMT en el sector automovilístico, no es de extrañar que muchos de sus proyectos se centren en la mejora de los MCIAs para lograr un funcionamiento mucho más respetuoso con el medio ambiente ante cualquier condición de funcionamiento.

1.3. Objetivos

1.3.1. Metas globales

El presente trabajo de final de grado forma parte del proyecto '*K9K: Performance and Emissions in Altitude*', el cual busca estudiar los cambios de comportamiento del motor K9K EURO6d-temp y analizar la variación de sus emisiones contaminantes cuando la altitud de conducción aumenta.

Más concretamente, este trabajo tiene como finalidad la caracterización de la regeneración activa del DPF atendiendo a los efectos que se producen con el incremento de la altitud; para lograr este propósito, se han examinado de manera conjunta resultados experimentales obtenidos en una sala de ensayos y simulaciones obtenidas mediante un modelo del sistema.

1.3.2. Objetivos específicos

Para alcanzar la meta expuesta fue necesario cumplir otros objetivos más específicos. Uno de estos consistió en la calibración del modelo de regeneración para así representar fielmente la realidad visualizada en los ensayos; además, se definieron las fases de la regeneración activa. Por otra parte, se determinaron las diferencias presentes en la regeneración con el aumento de la altitud y de la carga del DPF. Finalmente, se determinaron los agentes responsables de dichas diferencias en altitud, y se buscó la manera de optimizar el proceso de regeneración activa ante estas condiciones de conducción.

1.4. Estructura del trabajo

A continuación, se introducen las diversas actividades que han permitido redactar este manuscrito, y se explica su papel en el desarrollo del estudio. Gran parte de estas tareas han sido realizadas en el marco de un contrato de prácticas en el CMT y abarcan desde la formación teórico-práctica hasta la búsqueda de conclusiones.

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

La primera actividad se centró en la adquisición de una formación teórica mediante la consulta y el estudio de diferentes fuentes bibliográficas. Gracias a esto se asentaron los conocimientos necesarios sobre los MCIAs, sus emisiones contaminantes, las normativas de emisiones y las estrategias utilizadas para reducir las emisiones. Cabe destacar que, parte de estos conocimientos teóricos se ven reflejados en el apartado 2 y, por ende, en la bibliografía; mientras que otros conocimientos fueron adquiridos gracias al trabajo diario junto a los profesionales del CMT.

Tras la consulta bibliográfica se adquirió la formación práctica para el uso de las diversas herramientas necesarias, permitiendo aligerar el ritmo de trabajo en las actividades futuras.

Una vez se obtuvo la formación adecuada se realizaron los múltiples ensayos (apartado 3) que consolidan uno de los pilares de este estudio. Estos ensayos, aparte de ser vitales para el logro de los objetivos propuestos, supusieron una gran parte de la estancia en el CMT y son uno de los mayores exponentes del presupuesto. Cabe destacar que, dado que los datos experimentales no pueden ser estudiados directamente, cada vez que un ensayo era realizado los datos de salida eran sometidos a un postprocesado, labor que se realizó gracias a diferentes herramientas explicadas en el apartado 3.3.

Después de obtener toda la información experimental necesaria, se estudió el fundamento teórico del modelo utilizado con el objetivo de familiarizarse con los diferentes parámetros de ajuste. Posteriormente se calibró el modelo de regeneración del DPF, esta fue otra de las actividades que mayor tiempo supusieron, dado que las calibraciones del DPF realizadas en el departamento del CMT nunca antes habían contemplado los cambios producidos por la altitud (apartado 4).

Combinando los resultados experimentales con los obtenidos mediante el modelo, se definieron las diferentes etapas de la regeneración del DPF; además, se determinaron los efectos de la altitud y de la carga del DPF sobre la tasa de oxidación del hollín. (apartado 5)

Finalmente, se hipotetizaron las causas por las cuales la regeneración se ralentiza con el incremento de la altitud, y se corroboraron dichas hipótesis mediante simulaciones realizadas con el modelo, obteniendo así las conclusiones de este estudio.

2. MARCO TEÓRICO

Como inicio de cualquier estudio, es de vital importancia una correcta formación bibliográfica, proceso que permite adquirir los conocimientos necesarios para realizar las diversas actividades que consolidan un trabajo de final de grado. En este apartado se comentarán algunos conceptos teóricos del MCI, sus emisiones contaminantes y sus técnicas de postratamiento.

2.1. MCI

Un motor térmico es una máquina capaz de transformar la energía térmica generada durante un proceso de combustión en energía mecánica.

En concreto, en los MCI, la combustión es interna, ya que esta se produce en el seno del propio fluido. Por otra parte, los MCI son motores volumétricos alternativos, puesto que el trabajo mecánico es generado gracias al desplazamiento lineal de un pistón.

El esquema mecánico genérico de este tipo de motores consta de un cilindro que aloja la mezcla de aire y combustible, y una cámara en la que se produce la combustión de dicha mezcla. Esta cámara es sellada herméticamente mediante el bloque, la culata, las válvulas y los pistones. Además, son los émbolos los que se mueven linealmente al son de los procesos de expansión y compresión de los fluidos. Finalmente, este movimiento lineal es convertido en una rotación y transmitido al cigüeñal mediante un mecanismo biela-manivela [1]. Estos elementos citados pueden verse en la siguiente figura:

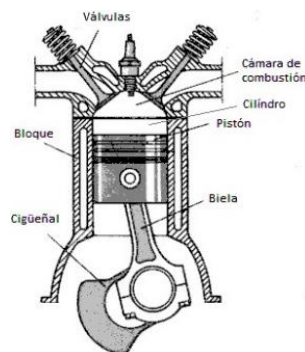


Figura 1. Esquema básico de un MCI [2]

Los procesos elementales que se realizan en los MCI son cinco: Admisión, compresión, combustión, expansión y escape. Estos procesos pueden realizarse en diferentes carreras del pistón según la configuración particular del motor (2 tiempos o 4 tiempos):

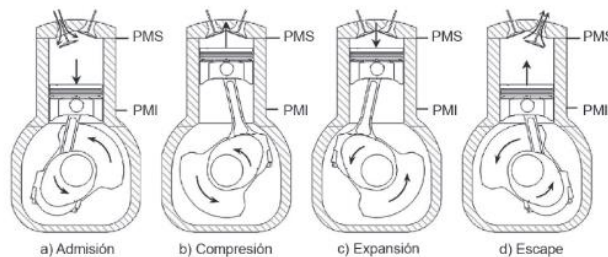


Figura 2. Procesos elementales de un motor de 4T como el K9K EURO6d-temp [1]

Existen otra multitud de criterios para clasificar los MCIAs, sin embargo, el más importante atiende a su proceso de combustión. Según esto se diferencian los motores de encendido por compresión (MEC) y los motores de encendido provocado (MEP).

2.1.1. Motor de encendido por compresión

Los MEC están basados en el ciclo Diesel, y en ellos la combustión es lograda por las altas temperaturas del aire del cilindro en el cual se inyecta el combustible. Estas temperaturas se alcanzan debido a la presión a la cual es sometida el cilindro durante la etapa de compresión. Tras esto, se pulveriza el combustible a gran presión, lo cual permite que se produzca la autoinflamación de una fracción de dicho combustible inyectado. Posteriormente, el resto de la mezcla se inflama por difusión térmica.

Debido a los procesos explicados, la mezcla es claramente heterogénea, ya que existen zonas con dosado, fracción entre la masa de combustible y la masa de aire, infinito y zonas con dosado nulo.

Además, la regulación de la carga se realiza de manera cualitativa, pues se hace aumentando o reduciendo la cantidad de combustible inyectado. [3]

Cabe destacar, que el motor K9K EURO6d-temp utilizado para este proyecto, y el cual explicaremos posteriormente en el apartado 3.1, se trata de un MEC.

2.1.2. Motor de encendido provocado

Este tipo de motores se basan en el ciclo Otto, y se caracterizan porque para poder iniciar la combustión es necesario aportar energía mediante una chispa eléctrica generada por una bujía. Esta chispa inicia un frente de llama, una zona de liberación de calor localizada, que consume gran parte de la mezcla en la cámara de combustión.

La correcta propagación del frente de llama se garantiza mediante una mezcla homogénea y un dosado próximo a los valores estequiométricos. Para conseguir esta homogeneidad, la mezcla se forma inyectando combustible durante la admisión, ya sea de forma directa (en la cámara de combustión) o indirecta (en una precámara de combustión), aunque en el pasado esta mezcla se obtenía en el carburador, pieza actualmente obsoleta. Por otra parte, para garantizar un dosado próximo al estequiométrico, es necesaria una regulación cuantitativa de la mezcla, lo cual se consigue mediante una válvula de mariposa. [4]

Finalmente, cabe destacar que los MEP usan como combustibles principalmente gasolina y gases licuados del petróleo, entre otros.

2.2. Emisiones contaminantes

Pese a todos los servicios y prestaciones que ofrecen los MCIAs, estos también son una importante fuente de contaminación. Esta contaminación puede ser de diferentes naturalezas: residuos, contaminación acústica, emisiones, inmisiones, etc. En concreto, las emisiones hacen referencia a cualquier contaminante emitido por un foco puntual o móvil.

2.2.1. Tipos de emisiones

Como ya se dijo en el apartado 1.1, las emisiones contaminantes generadas en un MCI son, principalmente, las partículas en suspensión, el dióxido de carbono, el monóxido de carbono, los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos sin quemar. A continuación, se explicarán todas las especies, centrándose en las partículas en suspensión, ya que, como se desarrollará en el apartado 2.3.2.1, estas son filtradas por el DPF, principal objeto de estudio de este trabajo

- ❖ Partículas en suspensión [5]: Son aquellas emisiones que en condiciones ambientales se encuentran en estado sólido o líquido. Debido a su naturaleza, las partículas sufren diferentes cambios físicos y químicos a lo largo de la línea de escape y cuando son emitidas a la atmósfera.

El sustrato inicial de estas emisiones es el hollín, el cual en los motores Diesel como el K9K Euro6d-temp se forma principalmente por ciclación, colisión de compuestos aromáticos policíclicos. Las partículas primarias de este sustrato se forman mediante un proceso de nucleación, y se estructuran en redes cristalinas siguiendo el siguiente esquema de formación:

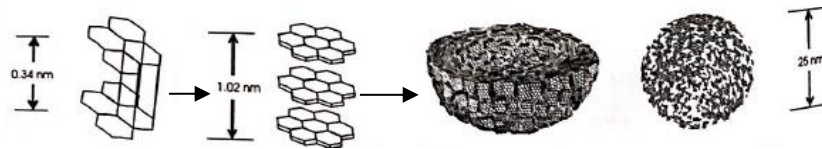


Figura 3. Esquema de formación de las partículas primarias del sustrato [5]

Tras esto, se produce una etapa de crecimiento de estas partículas primarias mediante la adición de masa en su superficie y mediante colisiones. Posteriormente, se produce la oxidación del carbono del hollín; y finalmente, las partículas restantes cambian de número y tamaño uniéndose entre ellas por medio de fuerzas de carácter atractivo como la cohesión molecular o la tensión superficial.

Cabe destacar que estos procesos de formación se potencian en zonas ricas (dosados altos) con temperatura elevada (valores superiores a 1600K), y que además se ven favorecidos por la recirculación de los gases de escape.

Los efectos de las partículas en suspensión sobre el ser humano y el medio ambiente son diversos, y dependen principalmente del tamaño de estas. Las partículas de menor tamaño son las que poseen mayor peligrosidad, ya que son capaces de penetrar en los alveolos pulmonares, residen durante mayor tiempo en la atmósfera y adsorben más fácilmente compuestos cancerígenos.

- ❖ Dióxido de carbono [6]: Esta especie no es realmente un contaminante, ya que se encuentra de manera natural en la atmósfera y no afecta directamente a la salud humana. Sin embargo, su concentración atmosférica se ha visto aumentada por la contribución de los MCI, aumentando así la temperatura del planeta por ser uno de los principales causantes del efecto invernadero.

Cabe destacar que el CO₂ es emitido de manera proporcional al combustible (con base de carbono) consumido por los MCI.

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

- ❖ **Monóxido de carbono:** Se trata de un gas tóxico e incoloro que es muy peligroso para el ser humano, ya que puede producir asfixia incluso en cantidades relativamente bajas, pues sustituye al oxígeno en la hemoglobina de la sangre. Este gas se genera durante las combustiones incompletas, por lo que su formación en los MCIAs está profundamente relacionada con el dosado [7].

En particular, en los motores Diesel, debido a la heterogeneidad de la mezcla, el monóxido de carbono se genera de forma local en puntos muy pobres por las combustiones lentas, o en puntos muy ricos por el consumo parcial del oxígeno en las combustiones incompletas [5].

- ❖ **Óxidos de azufre [8]:** Son compuestos que se forman a causa del contenido en azufre de los combustibles fósiles. Los SO_x son los principales causantes de la lluvia ácida, la cual tiene repercusiones nefastas para el medio ambiente como son la acidificación de las aguas y el suelo, y el aumento de la mortalidad de la fauna y la flora. Además, también suponen grandes riesgos para la salud humana, produciendo irritación, vómitos, mareos, etc.
- ❖ **Óxidos de nitrógeno:** Los NO_x generados principalmente en los MCIAs son el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂).

El NO se caracteriza por su alta reactividad, debido a esto es uno de los gases responsables de la reducción de la capa de ozono [9]; además, parte del NO generado en el motor se convierte en NO₂ [5].

Por su parte, el NO₂ contribuye en gran medida a la lluvia ácida y afecta el sistema respiratorio, además de ser tóxico e irritante [9].

- ❖ **Hidrocarburos sin quemar [5]:** Debido a las combustiones incompletas en el motor, parte de los HC del combustible son expulsados por el tubo de escape. Las consecuencias que causan estos compuestos en la salud humana y en el entorno son muy variadas, ya que su composición es muy heterogénea.

Entre los HC más relevantes destacan los hidrocarburos aromáticos policíclicos, que poseen una alta peligrosidad por ser cancerígenos y mutágenos; y los hidrocarburos carbonílicos, que son muy reactivos y tienen consecuencias en el medio ambiente como el smog fotoquímico.

- ❖ **Otros contaminantes:** Existen otros contaminantes como el ozono (O₃), los cloruros de plomo (PbCl₂), los bromuros de plomo (PbBr₂) o los compuestos orgánicos volátiles (COV).

El O₃ se trata de un contaminante secundario oxidante que en la troposfera puede causar daños en la flora, la fauna y la salud humana, así como contribuir en el efecto invernadero [10].

Los cloruros y los bromuros de plomo se forman a causa del contenido en cloro, plomo y bromo de los combustibles fósiles. En los humanos causan envenenamiento por plomo. Además, el plomo se acumula en la cadena trófica [6].

Los COV influyen en la destrucción del O₃ en la ozonósfera y en la formación de este en la troposfera [5].

2.2.2. Normativa europea

Actualmente los MCIAs, y sobre todo los MEC, están sometidos a regulaciones de emisiones muy estrictas. Estas regulaciones están redactadas en el Reglamento (CE) nº 2017/1347 del Parlamento Europeo y del Consejo [11] y controlan la emisión de CO, HC, NOx y PM con límites cada vez más ajustados respecto a la primera regulación:

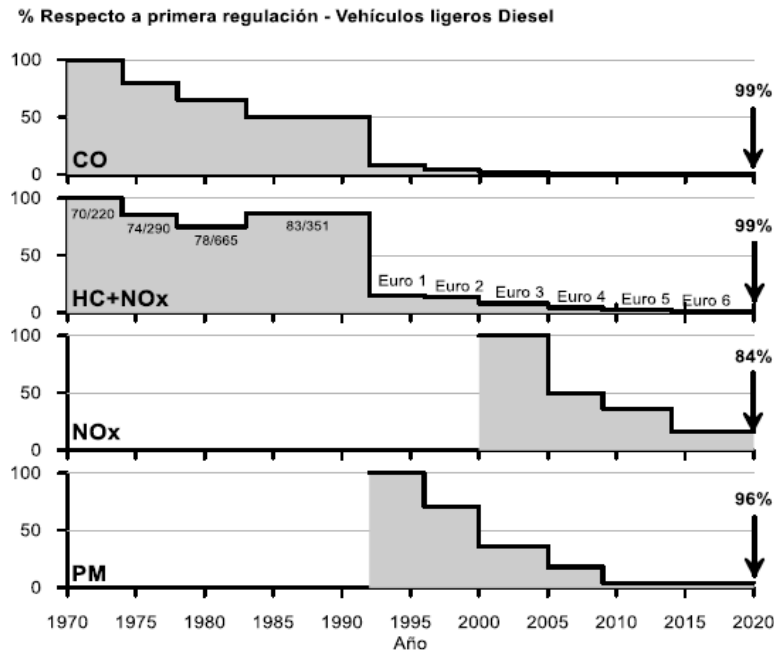


Figura 4. Evolución de los límites de emisiones contaminantes según las normativas europeas a lo largo de los años [12]

En Europa la última normativa aprobada ha sido la EURO 6d, la cual ha entrado en vigor progresivamente desde septiembre del 2014 hasta este mismo año. Así pues, los vehículos fabricados a partir de enero del 2020 han de cumplir ordenanzas que tratan puntos como: los límites de las emisiones contaminantes, la calidad mínima de los combustibles, los procedimientos utilizados para el control de las emisiones (WLTP y RDC) y el uso del OBD Euro 6-2.

Los límites de emisiones de la Euro 6d y las últimas normativas anteriores se resumen en la siguiente tabla:

Emisiones	Unit	PC M ²³ , LCV N1 CL 1			LCV N1 CL 2			LCV N1 CL 3, N2		
		Euro 5a	Euro 5b/b+	Euro 6b, 6c, 6d-Temp, 6d	Euro 5a	Euro 5b/b+	Euro 6b, 6c, 6d-Temp, 6d	Euro 5a	Euro 5b/b+	Euro 6b, 6c, 6d-Temp, 6d
EURO 5-6 Positive ignition emissions limits ((EC) 715/2007 as amended (EC) 692/2008)										
THC	mg/km	100	100	100	130	130	130	160	160	160
NMHC		68	68	68	90	90	90	108	108	108
NOx		60	60	60	75	75	75	82	82	82
CO		1000	1000	1000	1810	1810	1810	2270	2270	2270
PM ²³¹		5.0	4.5	4.5	5.0	4.5	4.5	5.0	4.5	4.5
PN ²³	Nb/km	-	-	6x10 ¹¹⁻⁴³	-	-	6x10 ¹¹⁻⁴¹	-	-	6x10 ¹¹⁻⁴³
EURO 5-6 Compression ignition emissions limits ((EC) 715/2007 as amended (EC) 692/2008)										
NOx	mg/km	180	180	80	235	235	105	280	280	125
HC+NOx		230	230	170	295	295	195	350	350	215
CO		500	500	500	630	630	630	740	740	740
PM ²³		5.0	4.5	4.5	5.0	5.0	4.5	5.0	5.0	4.5
PN ²³	Nb/km	-	6x10 ¹¹	6x10 ¹¹	-	6x10 ¹¹	6x10 ¹¹	-	6x10 ¹¹	6x10 ¹¹

Tabla 1. Límites de emisiones contaminantes según las últimas normativas europeas [13]

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

Por otra parte, los combustibles utilizados han de estar evaluados mediante pruebas de regulación y deben contener en su composición un 10% de etanol (etiqueta E10), en el caso de los motores de gasolina; y un 7% de biodiésel (etiqueta B7), en los motores Diesel.



Figura 5. Etiqueta E10 [14]



Figura 6. Etiqueta B7 [14]

El WLTP (*World Light Vehicles Test Procedure*) es un estándar utilizado para determinar los niveles de emisiones, y que ha sustituido al NEDC, procedimiento utilizado hasta la Euro 6c. El WLTP se compone de ciclos WLTC (*The Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles*) que dependen de la potencia específica y la velocidad máxima del motor:

Category		PMR (W/kg)	Speed Phases
Class 3	3a ($v_{max} < 120$ km/h)	PMR > 34	Low ₃ +Medium ₃₋₁ +High ₃₋₂ +Extra High ₃ ²⁾
	3b ($v_{max} \geq 120$ km/h)		Low ₃ +Medium ₃₋₂ +High ₃₋₂ +Extra High ₃ ²⁾
Class 2		22 < PMR ≤ 34	Low ₂ +Medium ₂ +High ₂ +Extra High ₂ ²⁾
Class 1		PMR ≤ 22	Low ₁ +Medium ₁ +Low ₁

Tabla 2. Ciclos WLTC en función de la potencia específica y la velocidad máxima [13]

Cada uno de estos ciclos está formado por paradas, aceleraciones o frenadas, que permiten reproducir situaciones reales. En el caso de un motor como el K9K EURO6d-temp, los ciclos realizados corresponden con la clase 3b (tabla 2). A continuación, se muestran las duraciones de los ciclos y un ejemplo de dicho ensayo:

Phase	Duration(s)	Phase	Duration(s)
Low Speed	589	High Speed	455
Medium Speed	433	Extra-High Speed	323
Tot. = 1800 s			

Tabla 3. Duraciones de los ciclos WLTC en un ensayo de clase 3b [13]

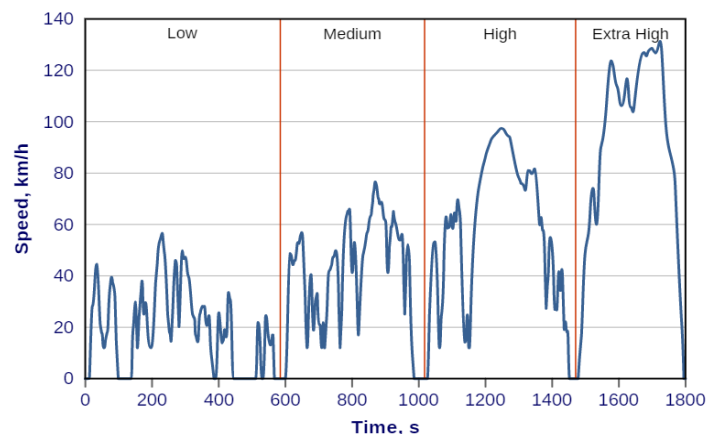


Figura 7. Velocidad de un vehículo de clase 3b en un ensayo WLTP [15]

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

Por otro lado, el RDE (*Real Driving Emissions*) es un examen adicional que mide las emisiones en condiciones de conducción real mediante un sistema portátil de medición de emisiones (PEMS). Esta prueba consta de tres partes, un primer tramo en vía urbana, un segundo por zonas rurales, y finaliza con conducción en autopista:

Trip requirements for a valid RDE test			
Driving portion	Urban	Rural	Motorway
	Speed ≤ 60 km/h	$60 < \text{Speed} \leq 90$ km/h ⁽¹⁾	90 km/h ⁽¹⁾ < Speed
Minimum distance	16 km	16 km	16 km
Distance share	29 - 44%	23 - 43%	23 - 43%
Total trip duration	90 - 120 minutes		
Average speed including stops	$15 < \text{Avg} < 40$ km/h ⁽²⁾	–	–
Total stop time ⁽³⁾ (v < 1 km/h)	6 - 30% Urban time	–	–
Individual stop time	≤ 300 sec	–	–
v > 100 km/h ⁽¹⁾⁽²⁾	–	–	≥ 5 min
v > 145 km/h	–	–	< 3% Motorway time
Cumulative positive elevation gain	< 1200 m / 100 km		
Start/end test elevation difference	≤ 100 m		

Tabla 4. Características de las diferentes fases de un ensayo RDE [13]

Cabe destacar que las emisiones medidas durante el RDE están afectadas por diferentes factores correctores:

Conformity Factors for Euro 6d RDE			
CF _{pollutant}	NO _x	PN ⁽²⁾	CO ⁽¹⁾
Temporary (Euro 6d-Temp)	2.1	1 + margin PN with margin PN = 0.5	–
Final (Euro 6d)	1 + margin with margin = 0.5	1 + margin PN with margin PN = 0.5	–

Tabla 5. Factores correctores de las emisiones en los ensayos RDE [13]

La Euro 6d también obliga el uso del OBD Euro 6-2, aparato que monitorea y controla los diferentes elementos del vehículo.

Por otra parte, esta normativa incorpora la obligación de realizar ensayos de validación en diferentes altitudes y con rangos moderados y extremos de temperatura. Así pues, los ensayos con altitudes menores a 700m requieren temperaturas de 0°C a 30°C; mientras que para altitudes mayores (hasta 1300m) las temperaturas de ensayo son más extremas, de -7°C a 0°C y de 30°C a 35°C.

Finalmente, cabe aclarar que el motor K9K EURO6d-temp es previo a esta generación, por lo cual cumple la EURO 6d-temp; sin embargo, esta normativa es muy similar a la Euro 6d, pues el mayor de sus cambios afecta los ensayos en altitud explicados en el párrafo anterior, y a los valores correctores establecidos en el RDE (véanse en la tabla 5).

2.3. Estrategias para reducir las emisiones

Existen diferentes estrategias con el objetivo de reducir las emisiones contaminantes y así cumplir la normativa establecida. Estas estrategias pueden actuar directamente sobre el diseño y las operaciones del motor (estrategias activas), o bien pueden tratarse de sistemas de postratamiento (pasivas) [6].

2.3.1. Estrategias activas

Las estrategias activas utilizadas en los MCIAs difieren según el tipo de combustión utilizada:

- ❖ En los MEC las principales estrategias activas afectan a la inyección del combustible y al control de la recirculación de los gases de escape (EGR):

Por una parte, cuando la inyección de combustible se hace con presiones elevadas se consiguen mejores mezclas, reduciendo así la formación de hollín, CO y HC, pero aumentando la temperatura en la cámara y con ello también la formación de NOx [16].

Por el contrario, cuando se utiliza la EGR, la temperatura alcanzada se ve menguada, y por ello se produce un decremento de los NOx formados; sin embargo, este fenómeno también aleja la combustión de la zona de oxidación del HC y el CO, aumentando así la producción de estos. Un efecto similar es el que tienen otras estrategias como la inyección de combustible por etapas o las inyecciones a baja temperatura, pues también reducen la liberación de calor [17].

- ❖ En cuanto a los MEP, las estrategias activas se centran en el diseño de las cámaras de combustión, la sobrealimentación, y el control de la EGR. Los diseños de cámaras más compactas y óptimas permiten la reducción de la formación de HC [18]. Por otra parte, la sobrealimentación también reduce los HC, ya que permite aumentar la masa de mezcla y con ello permite el uso de cámaras de combustión más pequeñas [19]. Por otra parte, al igual que en los MEC, la reducción de la temperatura mediante, por ejemplo, el uso de EGR, también permite disminuir la formación de los NOx [6].

2.3.2. Estrategias pasivas: Sistemas de postratamiento

En cuanto a las estrategias pasivas, los sistemas de postratamiento más utilizados son el DOC, el SCR, el LNT y el DPF. A continuación se explicarán los tres primeros, mientras que el DPF será abarcado de manera más amplia en el apartado posterior:

- ❖ El DOC es un sistema de postratamiento que conduce a los gases de escape a través de un monolito de panal de abeja para oxidar las emisiones de HC y CO presentes en ellos. El HC y el CO son oxidados en agua y dióxido de carbono gracias al O₂ sobrante de la combustión y a un recubrimiento de platino (Pt), catalizador presente en el monolito que acelera estas reacciones; por otra parte, el DOC también produce cambios en la composición de los NOx, ya que parte del NO se oxida a NO₂ gracias al Paladio (Pd). Estos procesos son los que se ven reflejados en la figura 8 [20].

Cabe destacar que, en los casos en los que el DOC opera junto a un DPF, las reacciones exotérmicas acontecidas en el DOC producen un aumento de la temperatura que permite que el DPF, el cual se sitúa justo aguas abajo, pueda quemar el hollín que ha atrapado durante su funcionamiento. Además, los cambios en la composición de los NOx también favorecen al SCR y a la regeneración pasiva del DPF [20].

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

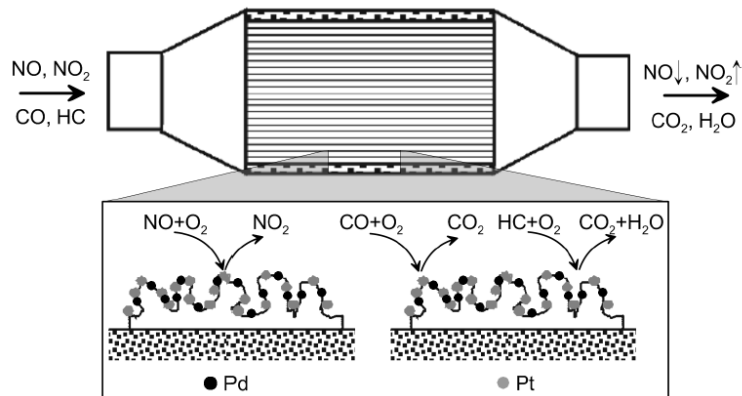


Figura 8. Esquema de un DOC y de las reacciones principales que acontecen en él [20]

- ❖ En el SCR se produce una disminución de los NOx; para lograrlo, primero los gases del escape se mezclan con un fluido, el cual suele contener urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) y agua en su composición. Esta mezcla reacciona formando amoníaco en un catalizador para la hidrólisis de la urea [21]. Posteriormente, estos compuestos entran en el SCR y se produce la reducción de los NOx, esto se consigue gracias a la presencia de diferentes catalizadores como los óxidos de vanadio y titanio [20]. Cabe destacar que los SCR son muy eficientes, alcanzando reducciones de los NOx de hasta el 95%. [22]

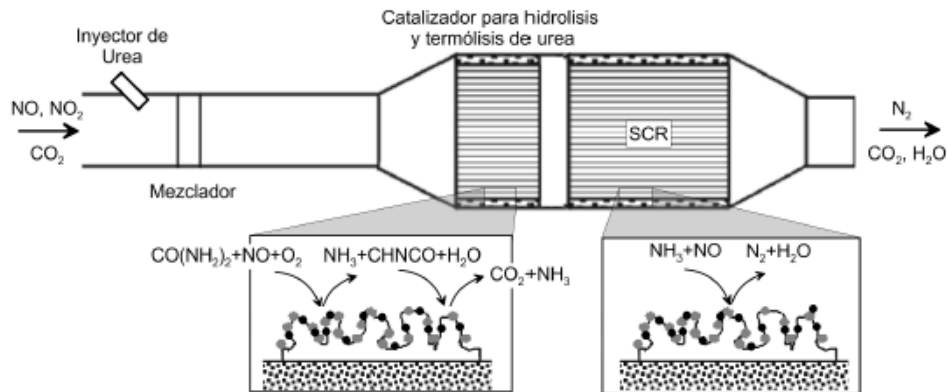


Figura 9. Esquema de un SCR y de las reacciones principales que acontecen en él [20]

- ❖ En el LNT también se disminuyen los NOx expulsados por el escape, aunque con rendimientos menores, los cuales no suelen superar el 80%. Sin embargo, este sistema de postratamiento también oxida el HC y el CO, lo cual permite al LNT sustituir al DOC y al SCR en los motores de baja cilindrada. La trampa de nitrógeno actúa de diferente forma según el dosado de la mezcla: cuando la mezcla es pobre el NO se oxida en NO2, y luego el NO2 se oxida de nuevo formando CO2 y $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$; por el contrario, cuando la mezcla es rica el proceso es prácticamente al revés, los NOx se liberan del $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ y se reducen mediante el CO [20].

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

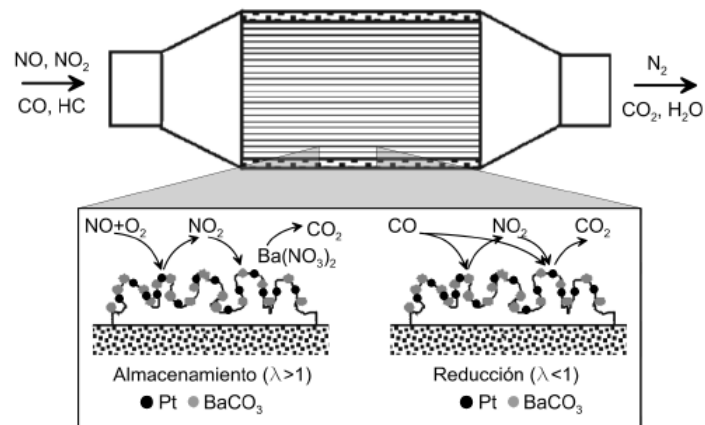


Figura 10. Esquema de un LNT y de las reacciones principales que acontecen en él [20]

2.3.2.1. DPF

El DPF es un sistema de postratamiento cuya función es evitar que las partículas de hollín previamente explicadas, y producidas durante la combustión, salgan a través del escape.

Cuando el filtro de partículas Diesel de flujo de pared comienza a operar, las partículas retenidas se van acumulando en su pared porosa, esto se conoce como filtrado en lecho profundo. Sin embargo, a medida que las partículas son atrapadas, llega un punto en que esta pared se satura, cuando esto ocurre la pérdida de presión causada por el DPF aumenta; esto, siempre que sea de manera controlada, produce un aumento de la eficiencia de filtrado, ya que la capa de partículas retenidas permite que se produzca un filtrado más intensivo conocido como filtrado en régimen superficial. Para poder controlar este fenómeno y evitar que la caída de presión alcance valores demasiado altos que limiten el funcionamiento del motor y aumenten su consumo de combustible, se realizan regeneraciones periódicas que permiten descongestionar estos equipos, e incluso algunos son equipados con catalizadores que aceleran la oxidación del hollín retenido [23].



Figura 11. Regímenes de funcionamiento de un DPF de flujo de pared [23]

Cabe destacar que entre los diferentes tipos de DPF destacan los de flujo de pared, en los cuales nos centraremos por ser esta tipología la que opera en el motor K9K EURO6d-temp. Estos DPF consiguen retener las partículas mediante estructuras monolíticas porosas, unas estructuras que capturan partículas de hasta 10 μm mediante su alta superficie de filtrado [24]. Además, este tipo de filtros de partículas combinan los dos regímenes de funcionamiento anteriormente citados [25]: cuando el filtro comienza a operar el régimen de lecho profundo es predominante, mientras que a medida que la pared se satura el régimen superficial se va haciendo cada vez más relevante con las consecuencias que ello conlleva y que se ven reflejadas en siguiente figura:

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

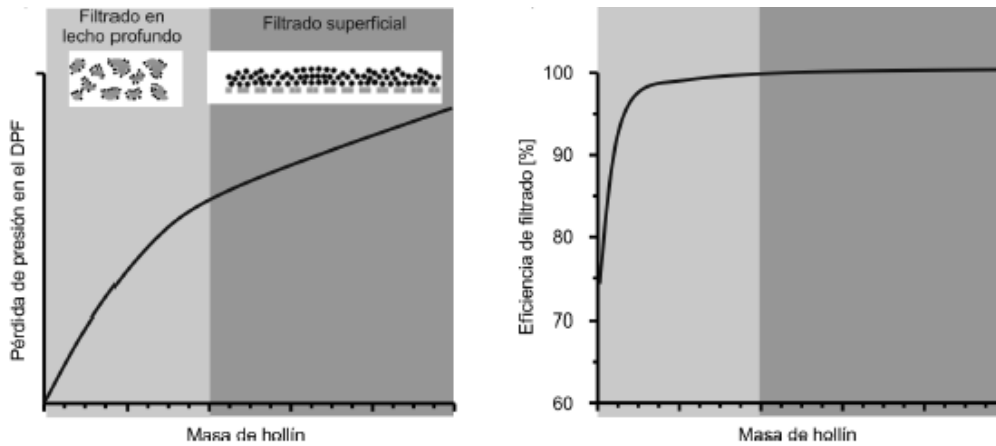


Figura 12. Pérdida de presión y eficiencia de filtrado del DPF a medida que aumenta la masa de hollín retenida [25]

Por otra parte, para conseguir que el DPF opere de manera correcta, también es importante prestar atención a los materiales utilizados para su aislamiento, ya que el intercambio térmico de los filtros con el exterior afecta a la regeneración. Cuando estas pérdidas de temperatura son muy elevadas se producen gradientes térmicos muy pronunciados, los cuales hacen que la reacción de oxidación sea menos homogénea y reducen su eficiencia [23].

2.3.2.1.1. Regeneración activa

Para que se produzcan las reacciones de oxidación que inician la regeneración, se requiere que los gases de escape a la entrada del DPF alcancen temperaturas de hasta 600°C, las cuales no son habituales en funcionamiento normal; en el caso de las técnicas de regeneración activa esto es paliado mediante la aportación de energía externa, por consiguiente, este tipo de técnicas aumentan el consumo del motor. Entre las técnicas de regeneración activa más usuales se encuentran el control del sistema de inyección, la estrangulación de la admisión mediante la apertura o el cierre de la EGR, y la apertura de la turbina de geometría variable (TGV).

Las estrategias basadas en la modificación del sistema de inyección recurren al uso de post-inyecciones, lo cual permite retrasar parcialmente la combustión del combustible, de manera que parte de este no se quema en el cilindro, sino que lo hace en el interior del catalizador de oxidación Diesel, aumentando así la temperatura de los gases de escape y haciendo posible la regeneración del DPF [26].

Las estrategias basadas en el estrangulamiento de la admisión tienen también un funcionamiento similar. Esta metodología permite incrementar el dosado mediante la disminución de la entrada de aire en el cilindro; este procedimiento hace posible trabajar en puntos de funcionamiento en alta carga, ya que parte del combustible no es quemado en la cámara, sino que, nuevamente, estos hidrocarburos se oxidan en el DOC, aumentando así la temperatura a la entrada del filtro de partículas hasta los valores necesarios [27].

Por otra parte, mediante la apertura de la TGV se consigue una reducción de la relación de expansión de la turbina, hecho que reduce considerablemente las pérdidas térmicas, permitiendo alcanzar también la temperatura necesaria a la entrada del DPF para que se produzca la regeneración.

Finalmente cabe destacar que, pese a que lo más habitual es combinar las técnicas explicadas para construir una estrategia de regeneración activa, también existen otros métodos menos usuales basados en el uso de calentadores eléctricos [28], quemadores [25] o inyecciones de combustible directamente en el DOC [29].

2.3.2.1.2. *Regeneración pasiva*

Las técnicas de regeneración pasiva buscan lograr dar comienzo a las reacciones de oxidación del hollín sin la necesidad de aumentar la temperatura de los gases de escape. Estas técnicas, pese a que no requieren de un aporte de energía externo que aumente el consumo del vehículo, son menos efectivas que las técnicas de regeneración activa, y por ello, su uso usualmente es complementario a estas otras; cosa que, sin embargo, no les resta importancia [23]. Entre las metodologías de regeneración pasiva más usuales destacan la oxidación del hollín mediante NO₂, el uso de recubrimientos de las paredes del sustrato con catalizadores y el uso de aditivos.

En relación con la primera estrategia, el NO₂ permite regenerar el DPF a temperaturas superiores a 300°C, las cuales sí son alcanzadas de manera habitual por los gases de escape [30]. Este NO₂ se consigue gracias al DOC, el cual, como ya se adelantó en el apartado 2.3.2, oxida parte del NO en NO₂ [20]. Sin embargo, esta reacción es muy lenta y habitualmente no se dan los tiempos necesarios para que sea tan efectiva como sería deseable, por lo que usualmente su uso es complementado mediante la utilización de catalizadores que aceleran este proceso [31].

Por otra parte, los recubrimientos con catalizadores [32] también permiten reducir las partículas de hollín, aunque de manera limitada, puesto que únicamente las partículas próximas al catalizador logran oxidarse [25]. Por ello también suelen combinarse con la oxidación mediante NO₂.

Por último, el uso de diferentes aditivos también permite reducir la temperatura de oxidación del hollín [32], facilitando así la regeneración del DPF.

3. ENSAYOS DE REGENERACIÓN DEL DPF A DIFERENTES ALTITUDES

Los diferentes ensayos que han posibilitado la obtención de los datos que consolidan la base de este estudio, se han realizado en el edificio 8P del Campus de Vera de la *Universitat Politècnica de València*.

A continuación se describen las características del motor utilizado y sus sistemas auxiliares y de postratamiento. También se describe brevemente la sala de acondicionamiento del aire y los diferentes equipos de medición. Por otra parte, se detalla la metodología empleada en la realización de los ensayos, las estrategias de inyección utilizadas y los métodos de postratamiento de datos.

3.1. Descripción de la sala de ensayos

Las dos salas que albergan todos los equipos utilizados en los ensayos son la número cinco y seis del edificio 8P; estas salas son contiguas y disponen de ventanales que permiten controlar en todo momento lo que está ocurriendo dentro de ellas. En la sala 5 se halla el simulador de altitud; mientras que en la sala 6 se encuentran: el motor, el freno asíncrono, los sistemas de postratamiento de emisiones contaminantes, etc. Por otra parte, en ambas salas existen otros equipos auxiliares y de medición.

Como ya se ha adelantado en apartados previos, el motor utilizado para ensayar es el K9K Euro 6d-temp de Renault, un MEC de 4T y cuatro cilindros en línea, cuyas especificaciones se describen en la tabla 6. Este motor se ubica sobre una bancada y está conectado a un freno asíncrono, el cual regula su par, velocidad y potencia. Además, el K9K Euro 6d-temp cuenta con un sistema de inyección de *common-rail*, una TGV, intercambiadores de calor (WCAC) y un sistema de recirculación de gases de escape refrigerados de baja presión (LP-EGR).

Tipo de motor	HSDI Diésel
Normativa de emisiones	Euro6d-temp
Volumen desplazado [cm ³]	1461
Diámetro de los cilindros [mm]	76
Carrera del pistón [mm]	80,5
Número de válvulas	2 por cilindro (8 en total)
Relación de compresión	15,16:1
Potencia máxima & velocidad	81kW & 4000rpm
Par máximo & velocidad	260Nm & 1750rpm

Tabla 6. Especificaciones del motor K9K Euro6d-Temp

Los sistemas de postratamiento de los que se dispone son un DOC y un DPF. El primero de ellos oxida las emisiones de HC y CO gracias a una mezcla de paladio y platino que acelera dichas reacciones. Dado que el DOC requiere del oxígeno sobrante de la combustión, este equipo se encuentra ubicado justo tras la turbina del turbocompresor. Por otra parte, el DPF utilizado es de flujo de pared, y se sitúa justo tras el DOC, ya que aprovecha el aumento de temperatura ocasionado en la oxidación del HC y el CO. Las características de ambos sistemas de postratamiento se disponen respectivamente en las tablas 7 y 8:

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

Diámetro [mm]	120
Longitud del canal de filtrado [mm]	140
Sección del canal de filtrado	Cuadrada
Densidad de celdas en el filtro [cpsí]	400
Tamaño de celda [mm]	1,04
Espesor de la pared [mm]	0,23
Área catalizada con Pt+Pd [m ²]	3,95

Tabla 7. Especificaciones del DOC

Diámetro [mm]	170
Longitud del canal de filtrado [mm]	70
Sección del canal de filtrado	Cuadrada
Densidad de celdas en el filtro [cpsí]	400
Tamaño de celda [mm]	0,95
Espesor de la pared [mm]	0,32
Área de filtrado [m ²]	2,1
Porosidad [%]	40
Diámetro medio de poro [μm]	20,4
Permeabilidad [m ²]	7,59

Tabla 8. Especificaciones del DPF

Para medir las emisiones contaminantes antes y después de los sistemas de postratamiento se utilizan diferentes equipos de medición:

- ❖ *AVL Opacimeter 439*: este equipo está colocado aguas abajo del DOC y mide la opacidad de los gases para así saber la cantidad de humos contenidos y estimar la composición de CO y HC.
- ❖ *Horiba Mexa One*: se trata de un analizador de gases que permite medir en ppm la concentración de CO, CO₂, CH₄, HC, NO_x y O₂ aguas arriba y abajo de los sistemas de postratamiento.

Cabe destacar que, la calibración y el seguimiento del motor y de sus diferentes sistemas de postratamiento se realiza mediante la unidad de control del motor (ECU), la cual es gestionada por el hardware ETAS y el software INCA. Mediante la ECU se pueden controlar gran variedad de parámetros como las estrategias de inyección del motor, la apertura y cierre de válvulas, la posición de la TGV, etc.; de hecho, como se explicará en el siguiente apartado, las estrategias de regeneración del DPF son iniciadas y concluidas mediante la gestión de la ECU. Por el contrario, para el seguimiento de la presión de los cilindros del motor se requieren otros equipos; en concreto estas medidas se toman mediante dos transductores piezoeléctricos *Kistler 6055B* que convierten la presión de los cilindros 2 y 4 en una señal de voltaje, la cual es amplificada y posteriormente mostrada en un osciloscopio *Yokogawa DL850V*.

Por otra parte, dado que los ensayos requieren condiciones diferentes a las ambientales, es necesario un equipo para acondicionar el aire que entra en el motor. Esta labor es realizada por el *Mobile Efficient Dynamic Altitude Simulation (MEDAS)*, un simulador de altitud desarrollado por el CMT en colaboración con Horiba Europe GmbH, que permite variar la presión de la admisión mediante turbinas y compresores. Además, el MEDAS puede conectarse a un *MEDAS Temperature Module (MTM)* y/o a un *MEDAS Humidity Module (MHM)*; equipos que modifican la temperatura y la humedad de la admisión mediante intercambiadores de calor, calentadores y humidificadores. El MEDAS y sus diferentes módulos son controlados directamente mediante las pantallas de introducción de datos de las que disponen tales equipos, y sus rangos de trabajo son los siguientes:

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

MEDAS	Presión mínima [bar]	0,54 (equivalente a 5000 m s. n. m)
	Presión máxima [bar]	1,30 (equivalente a 2000m d. n. m.)
MTM	Temperatura mínima [°C]	-15
	Temperatura máxima [°C]	40
MHM	Humedad mínima [HR%]	10
	Humedad máxima [HR%]	90

Tabla 9. Rangos de trabajo del MEDAS, el MTM y el MHM

Finalmente, en ambas salas existen otros equipos para monitorear lo que ocurre en todo momento, tales como termopares, caudalímetros, sensores de presión, etc. Además, las salas cuentan con una serie de sistemas auxiliares en los que se incluyen: la extracción de los gases de escape; los sistemas de seguridad como setas y alarmas; y el suministro de agua, aire, electricidad, combustible y aire comprimido.

La ubicación de todos los elementos explicados en este apartado se puede visualizar en el siguiente esquema:

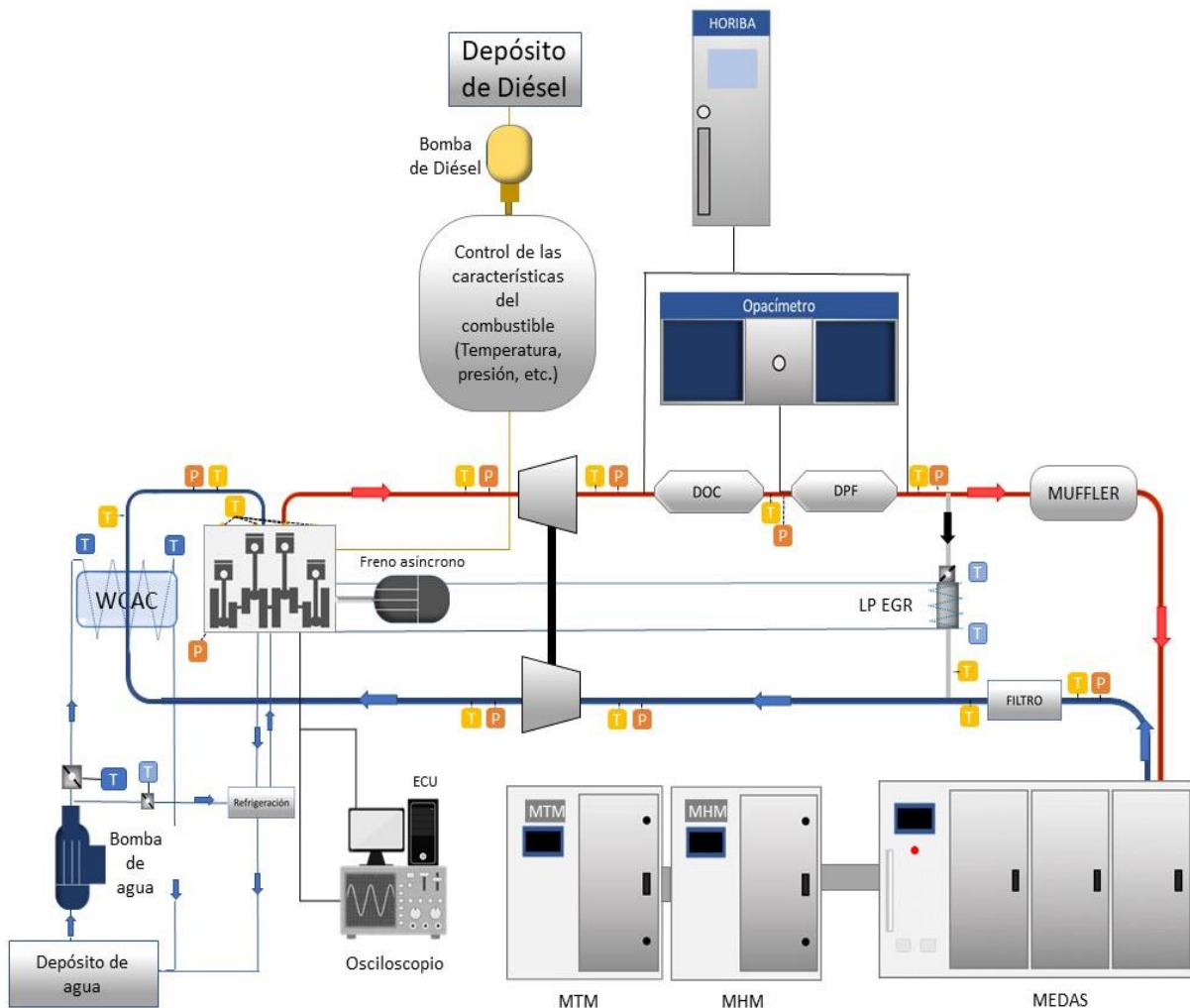


Figura 13. Salas de ensayos

3.2. Metodología de ensayos

Los ensayos realizados tienen como objetivo la caracterización de la regeneración activa del DPF para diferentes altitudes y caídas de presión iniciales. Las condiciones de contorno de temperatura y presión fueron de 27°C en el ambiente, 30°C en el intercambiador, y una presión de entrada de 1,013 bar, 0,867 bar y 0,747 bar según si la altitud deseada era de 0m, 1300m o 2500m respectivamente. Posteriormente, se procedió a cargar el DPF hasta que su caída de presión alcanzase valores de 12000Pa, 15000Pa o 22500Pa según el ensayo realizado. Tras la carga del DPF, la velocidad y el pedal del motor fueron fijados en 2000rpm y en un 35%, lo cual corresponde con 6,3 kg/h de flujo másico de combustible. El resto de las condiciones de contorno se especifican en la siguiente tabla:

	0m	1300m	2500m
Velocidad del motor [rpm]	2000	2000	2000
Par [Nm]	105	97	87,7
Pedal [%]	35	35	35
Flujo másico de combustible [Kg/h]	6,3	6,3	6,3
Flujo másico de aire [Kg/h]	125	123	124
Lambda HORIBA [-]	1,35	1,38	1,42
Lambda Motor [-]	1,36	1,38	1,4
Flujo másico de la LP-EGR [%]	7,2	7,3	7,1
Posición de la LP-EGR [-]	45 -> 16	45 -> 16	45 -> 16
Posición de la válvula de admisión [-]	65	65	65
Posición de la TGV [-]	63 -> 46	73 -> 67	80 -> 80,2
Velocidad del turbocompresor [rpm]	155000	200000	220000

Tabla 10. Condiciones de contorno de los ensayos

Después de disponer todas las condiciones iniciales, se activó la variable del INCA que controla la estrategia de regeneración (C_{sx_pft_stt_rgn_mnl}=32); esta estrategia consiste en añadir post-inyecciones al perfil de inyección, lo cual se explicará con mayor detalle en el siguiente subapartado de este manuscrito. Cabe destacar que, a lo largo de los ensayos, se realizaron mediciones arriba y abajo de los sistemas de postratamiento; además, para evitar variaciones en estas medidas a causa de cambios en la velocidad y/o el par del motor, las regeneraciones del DPF se realizaron en condiciones estacionarias.

Los ensayos fueron prolongados hasta que se alcanzaron una serie de criterios, los cuales son explicados con detalle en el apartado 5. Tras esto el ensayo se dio por concluido y se pararon los equipos de medición.

En la siguiente tabla se muestran a modo de resumen la caída de presión y la altitud de todos los ensayos realizados:

Presión de entrada	Altitud equivalente	Caída de presión en el DPF
1,013 bar	0m	12000Pa
		15000Pa
		22500Pa
0,867 bar	1300m	12000Pa
		15000Pa
		22500Pa
0,747 bar	2500m	12000Pa
		15000Pa
		22500Pa

Tabla 11. Condiciones de presión y carga de los diferentes ensayos

3.2.1. Estrategia de inyección

Como ya ha sido adelantado, la estrategia de regeneración utilizada se basa en la modificación del perfil de inyección. El perfil impuesto por Renault a altitud de cero metros es el que se describe en la tabla 12, y el cual consta, a parte de la inyección principal, de dos inyecciones piloto que acondicionan la cámara de combustión, y de tres post-inyecciones que tienen como objetivo que parte del combustible no se queme en la cámara de combustión, sino que se oxide en el DOC, aumentando así la temperatura a la salida de este y favoreciendo las reacciones que permiten que el DPF se regenere.

Inyección	Angulo [CAaTDC]	Cantidad inyectada [mg/cc]
Piloto 1	-25	1,2
Piloto 2	-12	1,29
Principal	3,5	17,03
Post 1	60,5	3,4
Post 2	135,5	1,7
Post 3	145	1,7

Tabla 12. Cantidad y ángulo de inyección

Cabe destacar que inicialmente este perfil no era igual para todas las condiciones de entrada, sino que la calibración original de regeneración que contenía la ECU era distinta para cada altitud para que la estrategia fuese óptima y se redujese el consumo específico del motor. Sin embargo, con el objetivo de no producir variaciones en los resultados de los ensayos por causas ajenas al aumento de la altura de conducción, se modificaron los perfiles y las cantidades de inyección de 1300 y 2500 metros, para que así coincidiesen con 0 metros. En la siguiente figura pueden verse los perfiles de inyección finalmente utilizados:

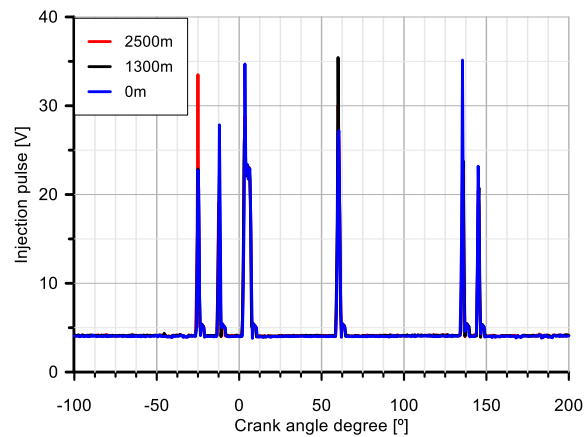


Figura 14. Perfiles de inyección

3.3. Herramientas de postprocesado de datos

Cuando los ensayos son realizados, los datos de salida no pueden interpretarse de manera directa, ya que cada una de las medidas realizadas durante el tiempo de grabación se encuentran desfasadas. Es por ello, que el primer paso tras ensayar consiste en procesar los datos para obtener información manejable y útil, esto se consigue mediante una rutina de Matlab que permite decodificar los archivos de los ensayos, poner en fase todos los valores de las mediciones (véase la figura 13) y realizar el cálculo de diversos parámetros que son útiles a lo largo del proceso de investigación.

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

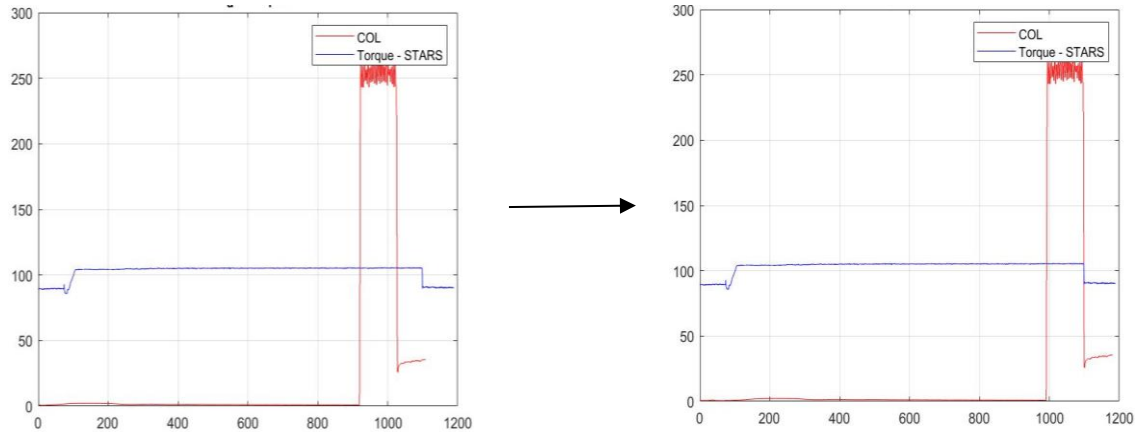


Figura 15. Emisiones de CO y par del motor a lo largo del tiempo, antes y después de ser puestos en fase

Tras realizar esta secuencia de actividades en Matlab, se obtiene un documento de extensión .xls que contiene todos los datos procesados. Este documento puede ser manipulado mediante Microsoft Excel, un programa de hojas de cálculo que también permite hacer representaciones rápidas de estos datos.

Entre las diferentes tareas realizadas con Excel para el desempeño de este trabajo, destacan el cálculo de las derivadas diferenciales de la caída de presión para su posterior estudio, la aplicación de medias móviles u otras técnicas correctoras para reducir el ruido de los datos (véase la figura 16), y el estudio detallado de los diferentes parámetros para establecer un criterio de inicio y fin de las regeneraciones del DPF.

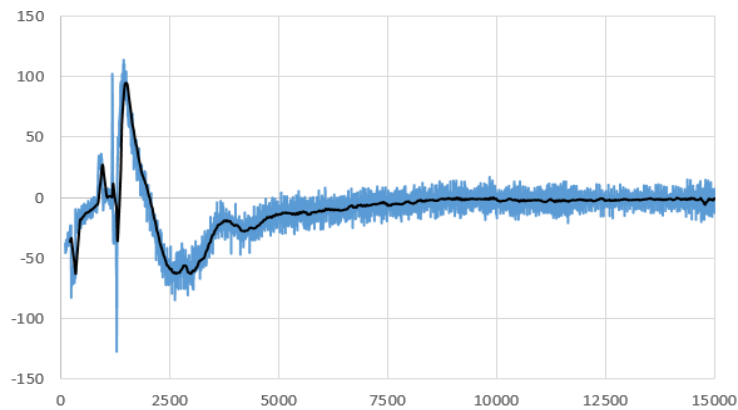


Figura 16. Derivada de la caída de presión del DPF antes y después de eliminarse el ruido de su señal

Por otra parte, los diversos cálculos realizados en Excel se complementan con diferentes herramientas de representación más precisas como Grapher 10, un programa para crear, editar y personalizar gráficos de alta calidad; y Matlab, que entre sus múltiples funcionalidades también se halla la representación de mapas de contorno.

Finalmente cabe destacar que, en ciertas ocasiones, las técnicas de las que dispone Excel, no son suficientes para eliminar el ruido de la señal completamente; en estos casos conviene utilizar otras herramientas como Matlab, ya que mediante funciones como el spline y otras rutinas, permite suavizar las medidas sin perder tanta información como podría ocurrir si se aplicasen medias móviles demasiado agresivas.

4. MODELO DEL DPF

La caracterización del proceso de regeneración del filtro de partículas se abarca mediante la comparación de los datos experimentales con los obtenidos mediante un modelo del sistema. Un modelo es una herramienta que permite conocer los parámetros característicos de un motor ante diferentes condiciones de contorno, por lo que son un instrumento muy útil a la hora de reducir los costes de cualquier estudio y de conocer la evolución de parámetros cuya obtención experimental sería costosa y complicada.

En este caso el modelo utilizado forma parte del software VEMOD [33], el cual ha sido proporcionado por el instituto de investigación CMT. Este software permite simular el comportamiento del DPF a partir de diferentes parámetros físicos, químicos y geométricos.

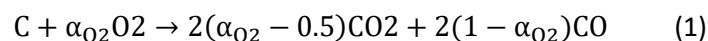
Más concretamente, el submodelo que simula la regeneración del DPF se trata de una adaptación de valor medio del modelo unidimensional (1D) presentado en [34]. Cabe destacar que los modelos de valor medio se caracterizan por su gran rapidez frente a otro tipo de modelos, debido a que carecen de resolución espacial, hecho que simplifica en gran medida los cálculos realizados, ya que, a diferencia de los modelos 1D, estos no contemplan las alteraciones axiales de algunos parámetros [35]. En este capítulo se explica el fundamento teórico del modelo, verificando así la validez de las simplificaciones comentadas, y se describen los procedimientos que han sido llevados a cabo para el ajuste del medio modelado.

4.1. Fundamento teórico del modelo de regeneración del DPF

Entre los parámetros más relevantes que consolidan el modelo de regeneración se encuentran las propiedades fisicoquímicas de las especies oxidantes, y diversos parámetros geométricos de las partículas y del medio poroso. Además, este modelo también se relaciona íntimamente con el submodelo de la caída de presión y el submodelo térmico, utilizados en los artículos [33] y [34].

- ❖ Propiedades de las especies gaseosas oxidantes: En primer lugar, cabe destacar que solo la oxidación del O₂ afecta significativamente a los procesos simulados, ya que los ensayos realizados oxidan el hollín mediante procesos de regeneración activa. Las propiedades fisicoquímicas del O₂ se calculan mediante la reacción de oxidación del carbono con el oxígeno, y con la ecuación del transporte convectivo [23].

En primer lugar, la reacción de oxidación del hollín es la que se muestra a continuación:



Donde α_{O_2} es el ratio de oxidación del O₂, parámetro cuya relevancia es descrita en [36].

Por otra parte, la ecuación del transporte convectivo del O₂ es la siguiente:

$$\frac{\partial(\rho u_w A_f Y_{O_2})}{\partial z} = \rho A_f \frac{M_{O_2}}{M} \dot{\omega}_{O_2} \quad (2)$$

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

Considerando la incompresibilidad del flujo y la velocidad de filtrado constante, de manera análoga al artículo [34], la ecuación del transporte queda de la siguiente manera:

$$u_w \frac{\partial(X_{O_2})}{\partial z} = -(S_{p,ext} + \eta_{int,O_2} S_{p,int}) k_{O_2} \alpha_{O_2} \theta_{O_2} \quad (3)$$

Donde la velocidad de filtrado del DPF (u_w) se determina según la ecuación 4 [23], y la constante cinética de la reacción de oxidación (k_{O_2}) se calcula según la ecuación de Arrhenius (ecuación 5):

$$u_w = \frac{Q}{4L_{in}\alpha N_{in}} \quad (4)$$

$$k_{O_2} = A_{O_2} e^{\frac{-EA}{RT}} \quad (5)$$

Otros parámetros como la superficie específica del hollín (S_p) y la eficiencia de la difusión del O₂ (η_{int,O_2}) se calculan y describen ampliamente en el artículo [34].

Por su parte, el recubrimiento superficial del O₂ (θ_{O_2}) se determina mediante la isoterma de Langmuir [34]. Cuya expresión general es la siguiente:

$$\theta_{O_2} = \frac{k_{S_{O_2}} p_{O_2}}{1 + k_{S_{O_2}} p_{O_2}} \quad (6)$$

A su vez, el término $k_{S_{O_2}}$ es la constante de equilibrio de la adsorción, la cual depende de la entalpía de la adsorción según la siguiente expresión:

$$k_{S_{O_2}} = A_{S_{O_2}} e^{\frac{-\Delta H_{S_{O_2}}}{RT_w}} \quad (7)$$

Finalmente, cabe destacar que las diferentes localizaciones del filtro para las que se aplican las ecuaciones expuestas son la capa de partículas y la pared del medio poroso.

- ❖ Submodelo de caída de presión: A grandes rasgos la pérdida de presión es causada por la fricción de los conductos, por causas inerciales y por la saturación de la pared porosa, ya que cuando esto último ocurre los gases se ven obligados a pasar a través de la capa de partículas [37].

$$\Delta p_{DPF} = \Delta p_{inercial} + \Delta p_{fr} + \Delta p_{Darcy} \quad (8)$$

El término referente a las consideraciones inerciales se define según la ecuación 7, en la cual se consideran los fenómenos de difusión y expansión del flujo mediante el coeficiente ζ_t [37]:

$$\Delta p_{inercial} = \frac{1}{2} \zeta_t \rho_{in} u_{in}^2 \quad (9)$$

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

Por otra parte, la caída de presión por la fricción de los gases se define según la ecuación 8 [38] con un coeficiente de fricción $F_w=28,459$ [39].

$$\Delta p_{fr} = \frac{1}{3} F_w \mu \left[\frac{u_{in} L_{in}}{(\alpha - 2(w_{pl} + w_{ash}))^2} + \frac{u_{out} L_{out}}{\alpha^2} \right] \quad (10)$$

Por otra parte, la pérdida de presión causada por el paso de los gases a través de la pared porosa se calcula siguiendo la ley de Darcy (ecuación 9), la cual se integra a lo largo de toda la capa de partículas para obtener la ecuación 10 [33]:

$$\Delta p_{Darcy} = \frac{\mu}{k} \int u_w(z) dz \quad (11)$$

$$\Delta p_{Darcy} = \frac{\mu Q L_{ef}}{2 V_{ef} \sigma L_{in}} \left(\frac{w_w}{k_{w,ef} \alpha} + \frac{1}{2 k_{pl}} \ln \left(\frac{\alpha - 2 w_{ash}}{\alpha - 2(w_{pl} + w_{ash})} \right) + \frac{1}{2 k_{ash}} \ln \left(\frac{\alpha}{\alpha - 2 w_{ash}} \right) \right) \quad (12)$$

Cabe destacar que esta última ecuación depende de diversas propiedades del medio poroso como son las pérdidas inerciales, la porosidad o el diámetro medio de los poros. Estas variables también son objeto de ajuste, por lo que en el siguiente punto se explica su impacto e implicación en los cálculos.

- ❖ Propiedades del medio poroso: las propiedades del medio poroso afectan en gran medida a la capacidad de filtrado y regeneración del DPF. Algunos de los parámetros que han sido relevantes para el ajuste del modelo son el diámetro medio del poro y la porosidad del medio poroso.

Por su parte, el diámetro medio del poro se calcula según la ecuación 11; este parámetro se relaciona con otras propiedades geométricas como la porosidad, el diámetro del colector y el diámetro de las celdas (ecuaciones 12 y 13), cuya relevancia en la regeneración se abarca en el artículo [33].

$$d_{p,w} = \frac{2}{3} \left(\frac{\varepsilon_w}{1 - \varepsilon_w} \right) d_{c,w} \quad (13)$$

$$\varepsilon_w = 1 - \left(\frac{d_{c,w}}{d_{cell,w}} \right)^3 \quad (14)$$

$$d_{cell,w} = \sqrt[3]{\frac{d_{c,w}^3}{1 - \varepsilon_w}} \quad (15)$$

Por otra parte, en dicho artículo también se define la masa a la cual se saturan las celdas, parámetro que nuevamente está relacionado con el diámetro del colector y el diámetro de las celdas según la ecuación 14.

$$m_{s,sat_{cell}} = \frac{4}{3} \pi \left(\left(\frac{\psi d_{cell,w}}{2} \right)^3 - \left(\frac{d_{c,w}}{2} \right)^3 \right) \rho_{s,w} \quad (16)$$

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

- ❖ Factor de forma de las partículas de hollín [33]: se trata de un factor que mide la forma en que el hollín se deposita en la pared porosa, por lo que afecta en gran medida a las propiedades del medio poroso y a la contrapresión. Este factor comprende valores desde 0, cuando la pared se encuentra limpia, hasta 1, cuando las partículas de hollín han ocupado por completo los poros de la pared porosa.

La ecuación que define este factor es la siguiente:

$$\chi = a_1(\phi_{ps})^{-a_2} + a_3 \quad (17)$$

Donde el término ϕ_{ps} es el factor de densidad del hollín, el cual se calcula según la ecuación 16.

$$\phi_{ps} = \frac{P_{s,w} V_{sp}}{m_{s,w}} \quad (18)$$

- ❖ Submodelo térmico: el cálculo de la temperatura a la salida del DPF se realiza mediante un modelo térmico cuyo esquema nodal se muestra en la figura 17, el cual es ampliamente explicado en el artículo [33]. En concreto, los únicos parámetros de este submodelo que fueron modificados durante el ajuste son: el coeficiente de transferencia de calor radial ($R_{rad,c}$), el factor corrector de transferencia de calor al exterior (R_{ext}), la temperatura inicial de la pared porosa (T_w) y la temperatura inicial de la capa de partículas ($T_{sur,int}$).

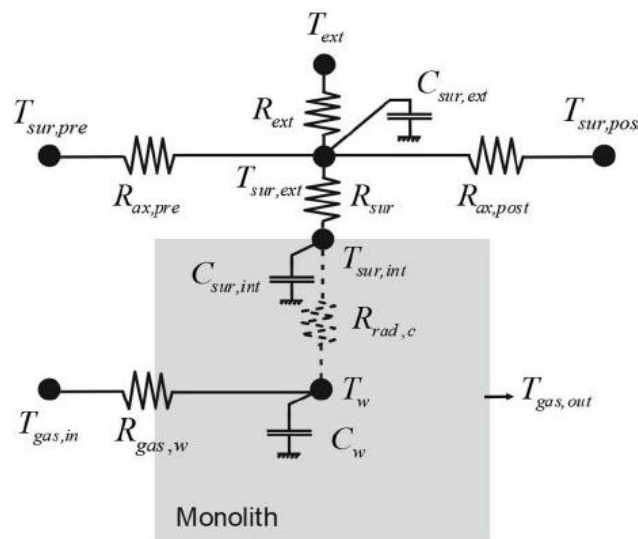


Figura 17. Esquema nodal del submodelo térmico

Finalmente, cabe destacar respecto a las limitaciones del modelo de valor medio que, debido a que no se consideran variaciones de los parámetros a nivel axial, el modelo asume que todas las partículas de hollín inician su combustión de una manera homogénea, hecho que en los ensayos con cargas muy elevadas del DPF ocasiona una reducción inicial de la caída de presión más acusada de lo que en la realidad ocurre [23]. Sin embargo, esta no es la única consecuencia, ya que las altas permeabilidades alcanzadas también afectan a la predicción de los picos térmicos [40], lo cual impide a los modelos de valor medio predecir el comportamiento de la regeneración en puntos en los cuales las temperaturas aumentan muy bruscamente.

4.2. Calibración del modelo

La calibración del modelo de regeneración se basó en los parámetros de ajuste utilizados en el artículo [34], el cual empleó los mismos equipos para la realización de sus ensayos. Sin embargo, se debieron realizar diversas modificaciones, ya que este otro estudio utilizó un modelo 1-D, cuyas principales diferencias han sido previamente comentadas; además, sus motivaciones también fueron muy diferentes a la del presente manuscrito, pues no se consideraron los cambios producidos con la altitud de conducción.

En primer lugar, para ajustar los parámetros de oxidación (tabla 13), se fijó la atención en la evolución de la caída de presión en los ensayos de 0m y se buscó un primer ajuste de estos parámetros que permitiese simular correctamente dicha evolución. Una vez hecho esto, se calculó el valor de la constante cinética en todas las altitudes con los parámetros establecidos. Posteriormente, para que la evolución de la caída de presión se ajustase también a 1300m y 2500m, se modificó el coeficiente pre-exponencial y la energía de activación, de tal manera que la constante cinética en 0m se mantuviese constante pero se modificase para el resto de las altitudes. Cabe destacar que, todo esto se hizo de manera recursiva junto al cambio del factor de pérdidas inerciales, hasta que la evolución de la caída de presión simulada en las tres altitudes fue lo suficientemente fiel a la realidad.

Capa de partículas (O ₂)	Coeficiente pre-exponencial	160	[-]
	Energía de activación	130000	[J/mol]
	Coeficiente pre-exponencial de la adsorción	1,00E-09	[-]
	Energía de activación de la adsorción	-77000	[J/mol]
Pared porosa (O ₂)	Coeficiente pre-exponencial	160	[-]
	Energía de activación	130000	[J/mol]
	Coeficiente pre-exponencial de la adsorción	1,00E-09	[-]
	Energía de activación de la adsorción	-77000	[J/mol]
Factor de pérdidas inerciales		65	[-]

Tabla 13. Parámetros de oxidación

También fue muy relevante la determinación de los coeficientes del factor de forma (tabla 14), cuya calibración fue diferente para cada uno de los estados de carga [41]. Para ajustar este parámetro se graficó la función que lo rige (ecuación 15), al mismo tiempo que se observó su repercusión en la caída de presión; posteriormente, se ajustó el factor de forma para los ensayos de 0m y se comprobó si este ajuste también funcionaba correctamente en el resto de las altitudes; y, en caso contrario, se volvió a modificar pertinentemente.

	Carga de hollín	a1	a2	a3
Igual para las tres altitudes	12000Pa	2,850	0,98	0,002
	15000Pa	2,635	0,98	0,002
	22500Pa	2,600	0,98	0,002
$\chi = a_1 (\Phi_{ps})^{-a_2} + a_3$				

Tabla 14. Coeficientes del factor de forma

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

En cuanto a la calibración de los parámetros térmicos, los cambios más relevantes hicieron referencia a las temperaturas iniciales de la pared porosa y de la capa de partículas (tabla 15). Para ajustar estos parámetros se graficaron los perfiles de temperatura y se comprobaron los instantes iniciales de los ensayos.

Ensayo		Temperatura inicial de la pared porosa [°C]	Temperatura inicial de la capa de partículas [°C]
0m	12000Pa	625,000	323
	15000Pa	625,000	
	22500Pa	583,000	
1300m	12000Pa	595,000	373
	15000Pa	616,000	
	22500Pa	650,000	
2500m	12000Pa	624,000	373
	15000Pa	605,000	
	22500Pa	636,000	

Tabla 15. Temperatura inicial de la pared porosa y de la capa de partículas

Finalmente, cabe destacar que también se realizaron otros ajustes más leves, los cuales hacen referencia tanto a parámetros geométricos (diámetro del poro medio, porosidad de la pared porosa y diámetro de las partículas), como térmicos (factor corrector de transferencia de calor al exterior y coeficiente de transferencia de calor radial):

Diámetro de poro medio	1,50E-05	[m]
Porosidad de la pared porosa	0,45	[-]
Diámetro de la partícula	0,7	[µm]
Factor corrector de transferencia de calor al exterior	8,475	[-]
Coeficiente de transferencia de calor radial	0,8526	[-]

Tabla 16. Otros parámetros geométricos y térmicos

5. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este apartado se definen las diversas etapas que se suceden durante la regeneración del DPF en base a los datos recabados durante los ensayos realizados y su modelado, también se establecen los criterios que determinan el final de la regeneración. Por otra parte, se estudia el efecto sobre la regeneración causado por el incremento de la altitud y de la caída de presión en el DPF.

5.1. Fases de la regeneración

Observando los resultados del primer ensayo realizado (0m y 12000Pa) se evidencia la existencia de tres fases de la regeneración del DPF.

En primer lugar, como ya se ha adelantado en apartados anteriores, se produce un aumento de la temperatura a la salida del DOC por la estrategia de regeneración utilizada (figura 18); esto causa un aumento brusco de la caída de presión inicial (figura 20), hecho que, sin embargo, aún no augura una reducción importante del hollín del DPF (figura 19). Así pues, esta primera etapa de precalentamiento se caracteriza por una derivada positiva de la caída de presión (figuras 21).

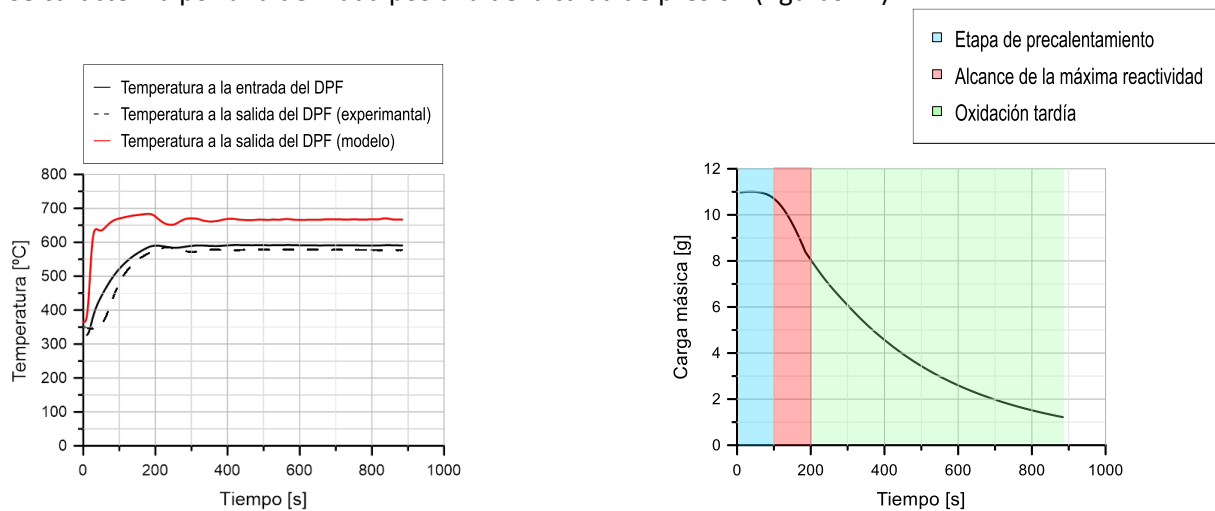


Figura 18. Temperatura: 0m – 12000Pa

Figura 19. Carga másica estimada por el modelo: 0m – 12000Pa

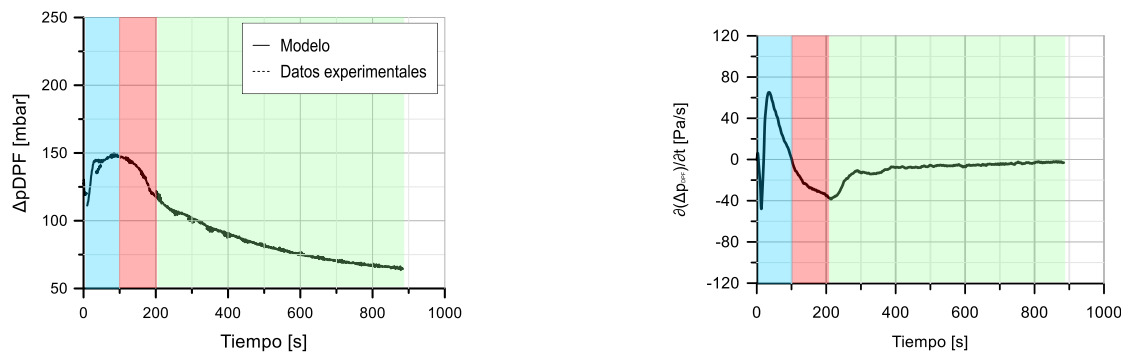


Figura 20. Caída de presión: 0m – 12000Pa

Figura 21. Derivada de la caída de presión calculada con datos experimentales: 0m – 12000Pa

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

Posteriormente, la oxidación del hollín va haciéndose cada vez más relevante, hasta que se alcanza el máximo de la caída de presión (figura 20), y por lo tanto, su derivada se hace cero (figura 21). Esto inicia una nueva etapa de la regeneración; durante esta fase la caída de presión aumenta muy rápidamente (figura 20) con el aumento progresivo de la reactividad de la reacción de oxidación del hollín, fenómeno que se refleja en una rápida reducción de la carga másica del filtro (figura 19). Tras esto la reactividad alcanza su máximo, lo cual se traduce en la pendiente más acusada de la caída de presión (figura 20) y, por lo tanto, en el mínimo de su derivada (figura 21).

Finalmente, tras alcanzar la máxima reactividad, esta se reduce progresivamente en lo que llamaremos etapa de oxidación tardía. Esta fase es la más longeva y su final no es claro, por lo que es necesario un criterio que permita establecer el fin de regeneración. Para que el ensayo sea dado por terminado, la derivada de la caída de presión debería ser igual a cero durante un tiempo mínimo de ensayo, lo cual significaría que la reacción de oxidación ha llegado a su fin; sin embargo, dado que es imposible eliminar por completo el ruido de las señales medidas, se considera que este criterio se cumple cuando la derivada de la caída de presión (figura 21) oscila entre el $\pm 5\%$ de su máximo durante al menos 50s.

5.2. Aumento de la caída de presión en el DPF

Posteriormente se realizaron otros ensayos a 0m, en los cuales, la caída de presión inicial en el DPF, y por ende la carga másica, fue incrementándose paulatinamente para ver su repercusión en la regeneración. En las siguientes gráficas puede observarse como, con dicho aumento, la regeneración cada vez es más rápida (pendientes de la caída de presión más acusadas).

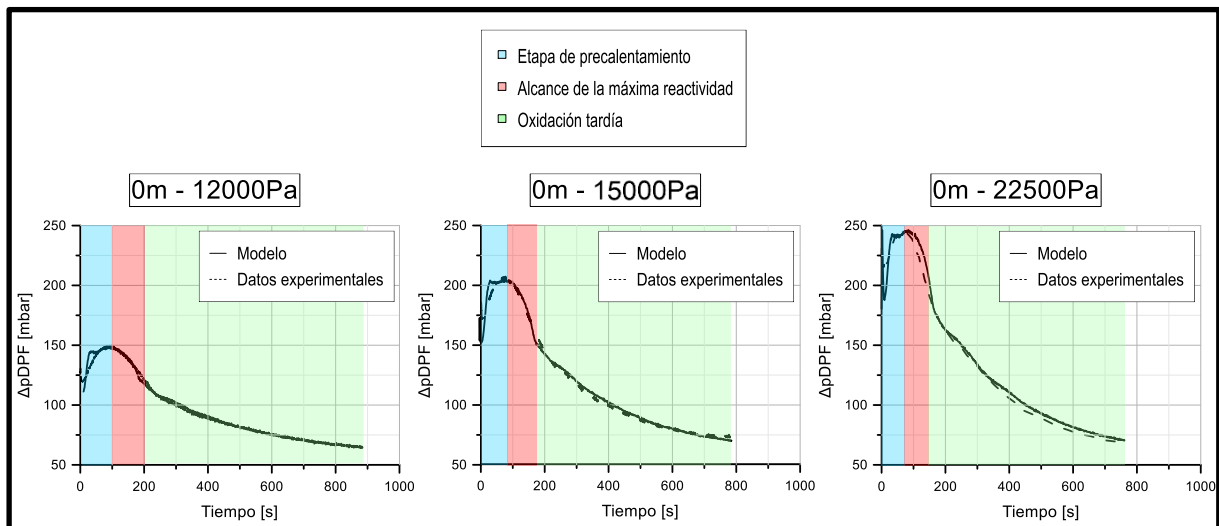


Figura 22. Evolución de la caída de presión en los ensayos de 0m

Las duraciones de las fases de la regeneración de estos ensayos se estimaron del mismo modo al explicado en el apartado 5.1. A continuación, se muestran las derivadas de la caída de presión de los ensayos de 15000Pa y 22500Pa, gráficas en las cuales puede verse mucho más claramente la distinción entre las diferentes etapas (figuras 23 y 24).

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

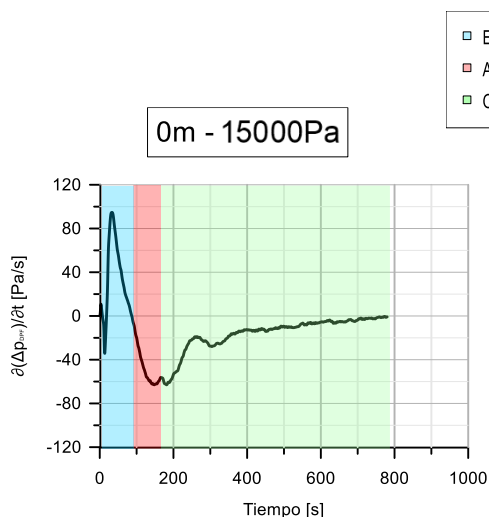


Figura 23. Derivada de la caída de presión calculada con datos experimentales: 0m – 15000Pa

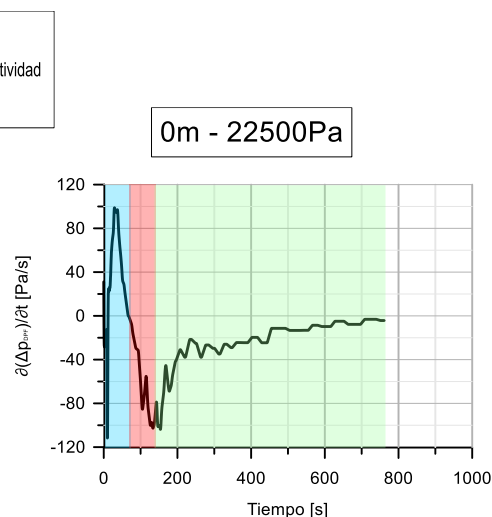


Figura 24. Derivada de la caída de presión calculada con datos experimentales: 0m – 22500Pa

Finalmente, midiendo las duraciones de las etapas (tabla 14), también puede observarse como, con el incremento de la caída de presión y de la carga del DPF, se produce una tendencia decreciente en los tiempos de las fases. Además, puede afirmarse no solo que la regeneración es más rápida, sino que cada vez es más eficaz en su tarea de quemar el hollín capturado, ya que la etapa en la que se alcanza la máxima reactividad cada vez dura menos, y la caída de presión del DPF al finalizar el ensayo (tabla 15) se reduce cada vez más.

	0m		
	12000Pa	15000Pa	22500Pa
Etapa de precalentamiento (s)	99	87	64
Alcance de la máxima reactividad (s)	106	83	73
Oxidación tardía (s)	679,1	610,2	624,2
Total (s)	884,1	780,2	761,2

Tabla 17. Duración de las etapas de la regeneración en los ensayos de 0m

Ensayo	ΔP inicial de ensayo [Pa]	ΔP final de ensayo [Pa]	Diferencia de ΔP [%]	ΔP máximo [Pa]	Tiempo total [s]	
0m	12000Pa	12780	6828	46,57	65,23	884
	15000Pa	17875	6509	63,59	94,74	780
	22500Pa	22424	6244	72,16	96,15	761

Tabla 18. Diferencia entre la caída de presión inicial y final en los ensayos de 0m

5.3. Incremento de la altitud

Tras el estudio a 0m se realizaron otros ensayos a 1300m y 2500m para estudiar el efecto de la altura de conducción en la regeneración del DPF, y comprobar si las conclusiones extraídas en los apartados previos pueden extrapolarse también.

5.3.1. 1300 metros

Comparando la evolución de la caída de presión en 0m y 1300m, puede verse como la velocidad de la regeneración se reduce con el aumento de la altitud, ya que los tiempos finales se incrementan levemente en 1300m. A continuación, se expone dicha comparación para los diferentes estados de carga iniciales:

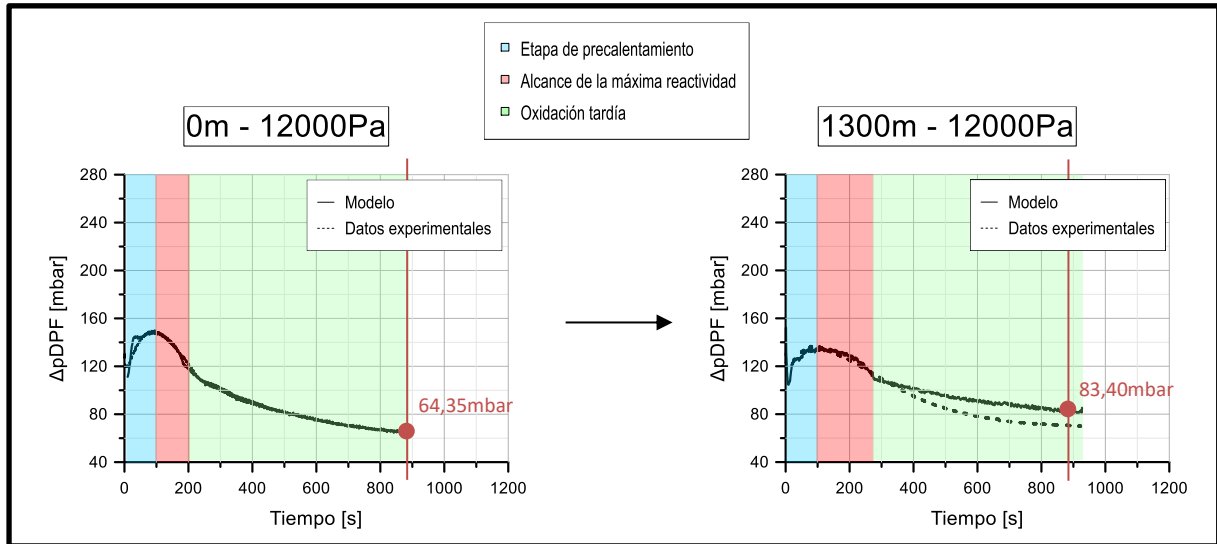


Figura 25. Caída de presión medida en el ensayo: 1300m – 12000Pa

Observando la comparación en los ensayos de 12000Pa, se denota que la tasa de oxidación se ve decrementada con el aumento de la altura, ya que en el mismo periodo de tiempo en que la regeneración de 0m se finaliza, la caída de presión a 1300m es mucho más alta: 83,4mbar en la simulación de 1300m, en contraposición a los 64,35mbar que hay en 0m.

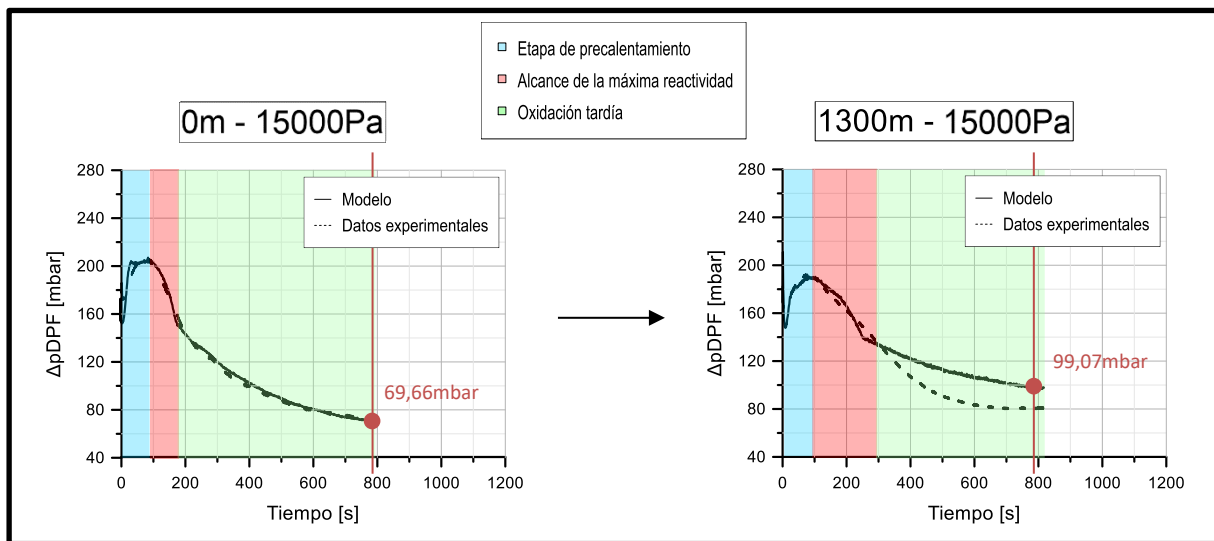


Figura 26. Caída de presión medida en el ensayo: 1300m – 15000Pa

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

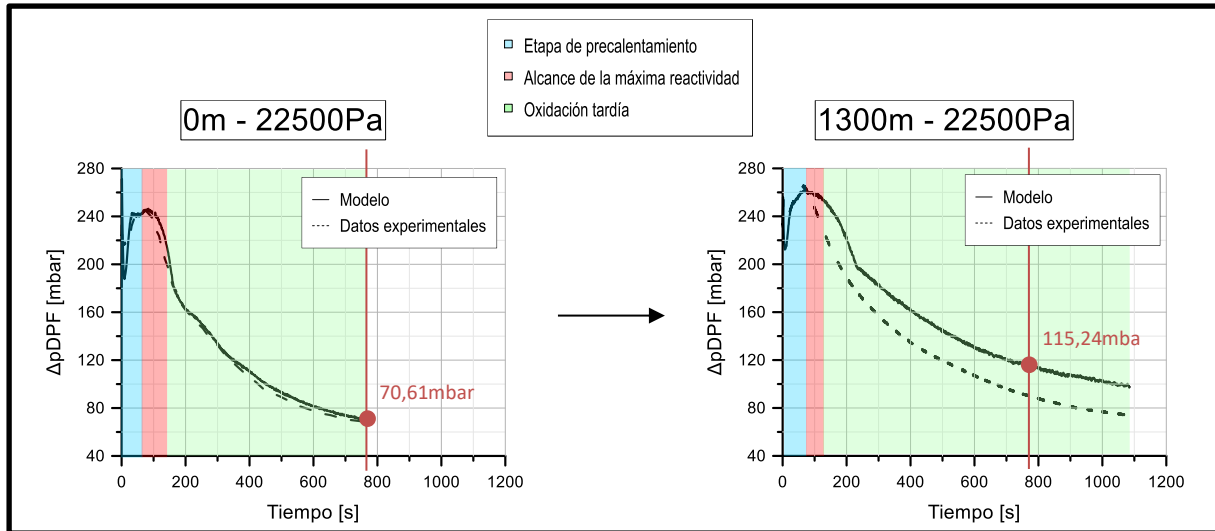


Figura 27. Caída de presión medida en el ensayo: 1300m – 22500Pa

Lo mismo ocurre en los ensayos de 15000Pa y 22500Pa: en el instante en que la regeneración de 0m se finaliza, la caída de presión a 1300m es mucho mayor (véanse los valores en las figuras 26 y 27).

Por el contrario, al observar la derivada de la caída de presión (figura 28) y las duraciones de las fases de la regeneración (tabla 16), puede parecer que no se obtienen resultados demasiado concluyentes, ya que no se aprecia una tendencia clara al comparar las duraciones de las etapas en 1300m.

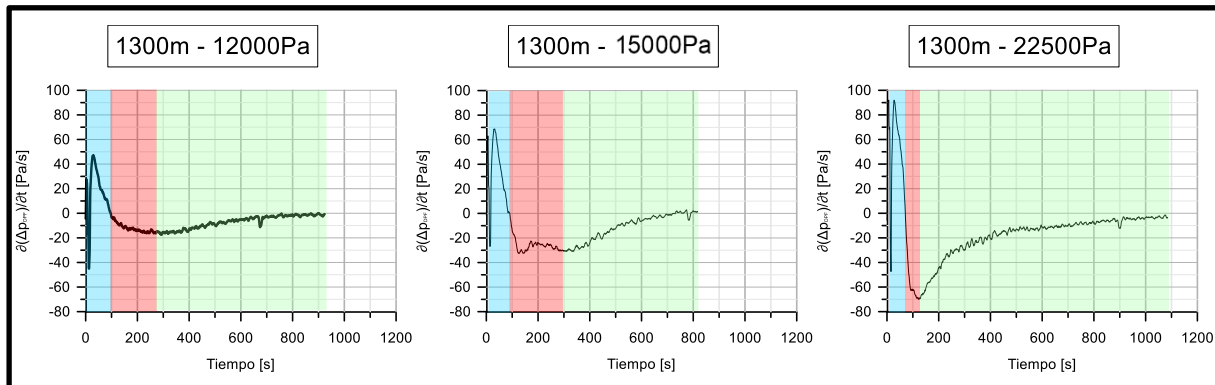


Figura 28. Derivada de la caída de presión calculada con los datos experimentales de 1300m

	0m		
	12000Pa	15000Pa	22500Pa
Etapa de precalentamiento (s)	99	87	64
Alcance de la máxima reactividad (s)	106	83	73
Oxidación tardía (s)	679,1	610,2	624,2
Total (s)	884,1	780,2	761,2
	1300m		
	12000Pa	15000Pa	22500Pa
Etapa de precalentamiento (s)	98	95	72
Alcance de la máxima reactividad (s)	172	195	58
Oxidación tardía (s)	652,7	526,7	955
Total (s)	922,7	816,7	1085

Tabla 19. Duración de las etapas de la regeneración en los ensayos de 0m y 1300m

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

Sin embargo, puede observarse como en cualquiera de los tres ensayos el máximo de la derivada de la caída de presión es menor en 1300m que en 0m; este dato, acompañado de la reducción porcentual de la caída de presión experimental y de la reducción de los tiempos de ensayo totales, permite concluir que la eficiencia de la regeneración se reduce con respecto a 0m:

Ensayo		ΔP inicial de ensayo [Pa]	ΔP final de ensayo [Pa]	Diferencia de ΔP [%]	ΔP máximo [Pa]	Tiempo total [s]
0m	12000Pa	12780	6828	46,57	65,23	884
	15000Pa	17875	6509	63,59	94,74	780
	22500Pa	22424	6244	72,16	96,15	761
1300m	12000Pa	12272	7631	37,82	47,08	933
	15000Pa	16868	8651	48,71	68,75	817
	22500Pa	23104	7349	68,19	91,95	1085

Tabla 20. Tiempo total de ensayo y caída de presión inicial, final y máxima en los ensayos de 0m y 1300m

5.3.2. 2500 metros

Al igual que en el caso anterior, en los ensayos de 2500m también se observa una ralentización con el incremento de la altitud, en este caso mucho más pronunciada, dando lugar a una evolución de la caída de presión muy calmada que se extiende durante largos tiempos de ensayo.

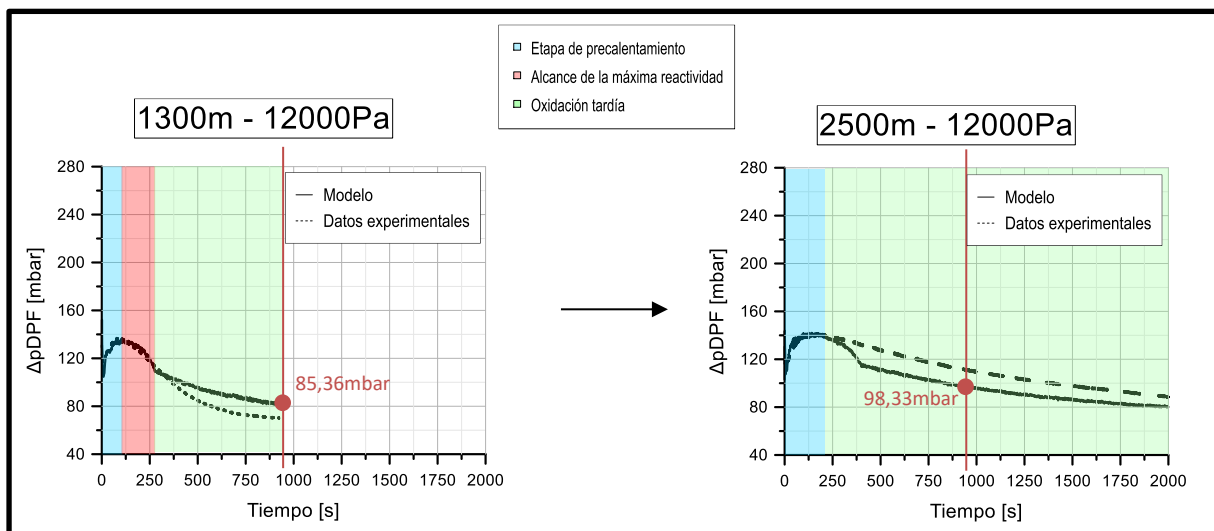
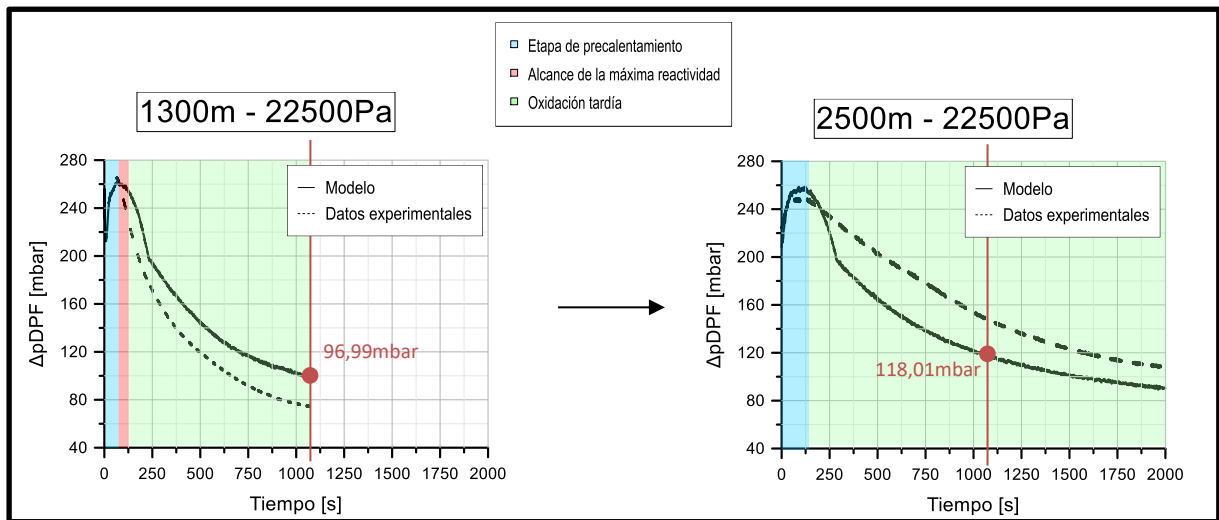
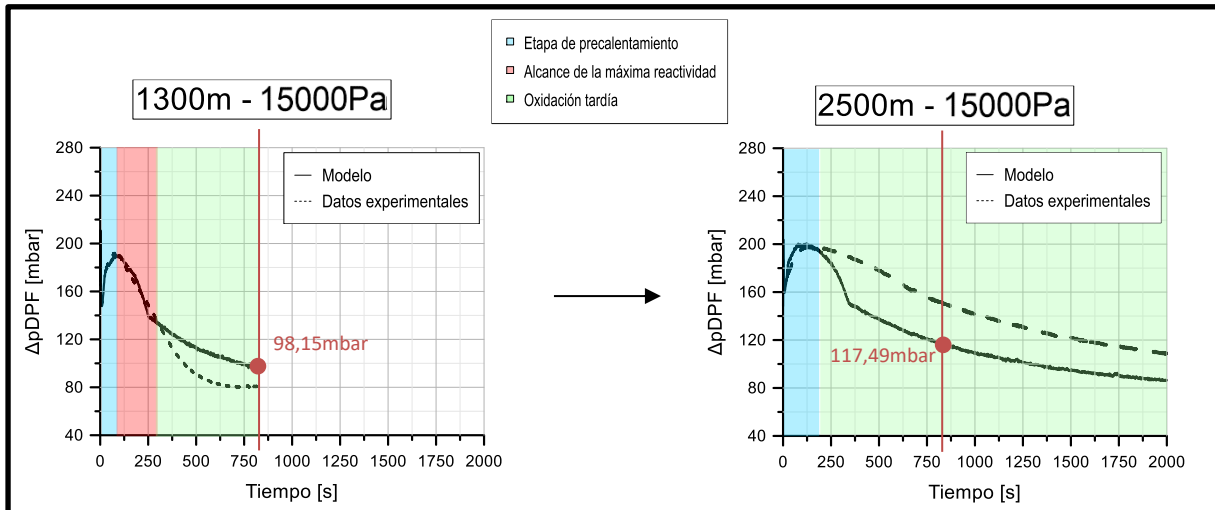


Figura 29. Caída de presión medida en el ensayo: 2500m – 12000Pa

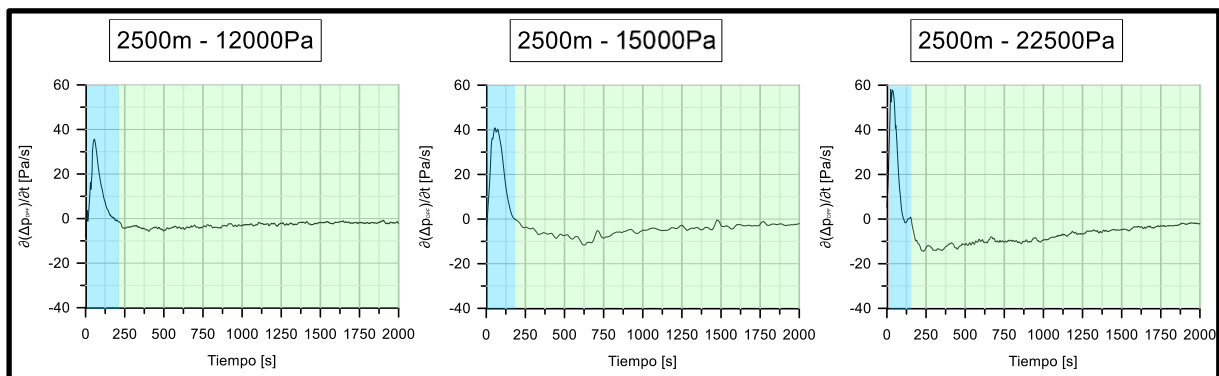
Al igual que ocurría en la comparación entre 1300m y 0m, en este caso también se reduce la tasa de oxidación con el aumento de la altitud de conducción. Cuando la simulación en el ensayo de 1300m y 12000Pa ya ha terminado, la caída de presión tiene un valor de 85,36mbar; mientras que en 2500m la caída de presión aún es de 98,33mbar.

Y nuevamente, para el resto de los estados de carga, dicho fenómeno se vuelve a repetir (véanse los valores en las figuras 30 y 31):

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción



Cabe destacar que, la duración de los ensayos aumenta en tal medida que no llega a cumplirse el criterio de fin de regeneración (derivada de la caída de presión oscilante entre el $\pm 5\%$ de su máximo durante al menos 50s), es por ello por lo que todos los ensayos de 2500m fueron terminados a los 2000s, ya que muchos de los equipos de medición no están capacitados para medir durante periodos de tiempo superiores.



Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

En estos ensayos, a diferencia de todos los anteriores, no puede verse de manera clara un mínimo en la derivada de la caída de presión (figura 32), lo cual puede significar que el punto de máxima reactividad es muy poco significativo en comparación con la reactividad del resto del ensayo, haciendo que la segunda fase de la regeneración sea prácticamente inexistente (tabla 21)

	0m		
	12000Pa	15000Pa	22500Pa
Etapa de precalentamiento (s)	99	87	64
Alcance de la máxima reactividad (s)	106	83	73
Oxidación tardía (s)	679,1	610,2	624,2
Total (s)	884,1	780,2	761,2
	1300m		
	12000Pa	15000Pa	22500Pa
Etapa de precalentamiento (s)	98	95	72
Alcance de la máxima reactividad (s)	172	195	58
Oxidación tardía (s)	652,7	526,7	955
Total (s)	922,7	816,7	1085
	2500m		
	12000Pa	15000Pa	22500Pa
Etapa de precalentamiento (s)	202	180	160
Alcance de la máxima reactividad (s)	1798	1820	1840
Total (s)	2000	2000	2000

Tabla 21. Duración de las etapas de la regeneración en los ensayos de 0m, 1300m y 2500m

Esto explica porque las duraciones son tan largas en comparación con las alturas de conducción menores. Además, la ausencia de la segunda etapa de la regeneración también se ve reflejada en la diferencia de la caída de presión experimental al inicio y al final, ya que se quema mucho menos hollín en 2500m que en 0m y 1300m (tabla 22).

	Ensayo	ΔP inicial de ensayo [Pa]	ΔP final de ensayo [Pa]	Diferencia de ΔP [%]	ΔP máximo [Pa]	Tiempo total [s]
0m	12000Pa	12780	6828	46,57	65,23	884
	15000Pa	17875	6509	63,59	94,74	780
	22500Pa	22424	6244	72,16	96,15	761
1300m	12000Pa	12272	7631	37,82	47,08	933
	15000Pa	16868	8651	48,71	68,75	817
	22500Pa	23104	7349	68,19	91,95	1085
2500m	12000Pa	11613	9128	21,40	35,66	>2000
	15000Pa	15872	7402	53,36	40,84	>2000
	22500Pa	22462	9237	58,88	52,50	>2000

Tabla 22. Tiempo total de ensayo y caída de presión inicial, final y máxima en los ensayos de 0m, 1300m y 2500m

6. CAUSAS DE LA RALENTIZACIÓN DE LA REGENERACIÓN CON EL AUMENTO DE LA ALTITUD

Cuando se incrementa la altitud de conducción se producen diversos cambios en las condiciones de entrada de los ensayos que, como se ha mostrado en los apartados previos, producen una ralentización de la regeneración en el DPF y una reducción de su efectividad.

De acuerdo con fuentes como [23] y [42], la reactividad de la regeneración del DPF depende en gran medida del recubrimiento superficial del reactivo, O₂ en el caso de la regeneración activa. Además, el recubrimiento superficial del O₂ se relaciona con su presión parcial y con la temperatura de los gases de escape según la isoterma de Langmuir (figura 33).

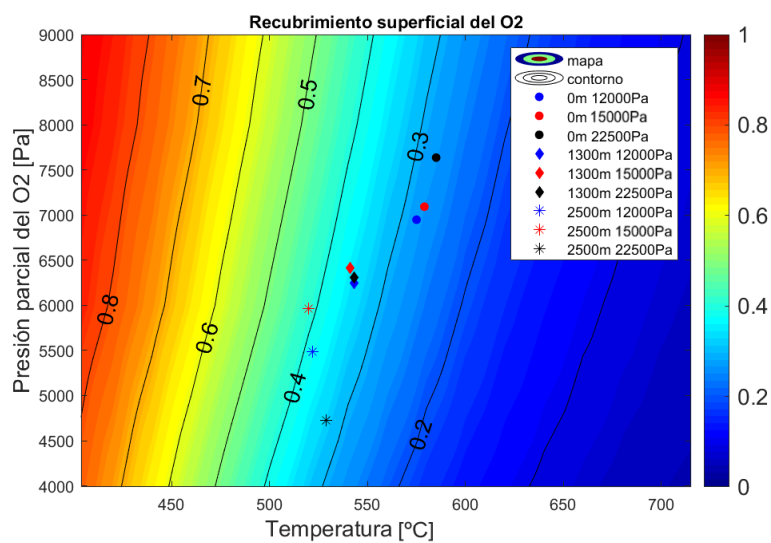


Figura 33. Recubrimiento superficial del O₂ en los ensayos

Si se representa nuevamente el recubrimiento superficial dejando únicamente como parámetro variable con la altitud la presión parcial del O₂ (figura 34) o la temperatura (figura 35), se puede estudiar de manera más certera la influencia aislada de cada uno de estos parámetros.

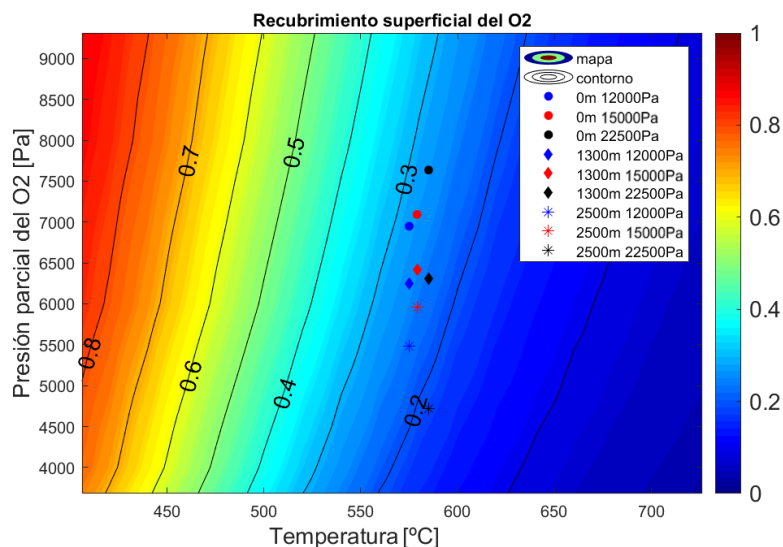


Figura 34. Recubrimiento superficial del O₂ en los ensayos si la presión parcial en 1300 y 2500m fuese la misma que en 0m

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

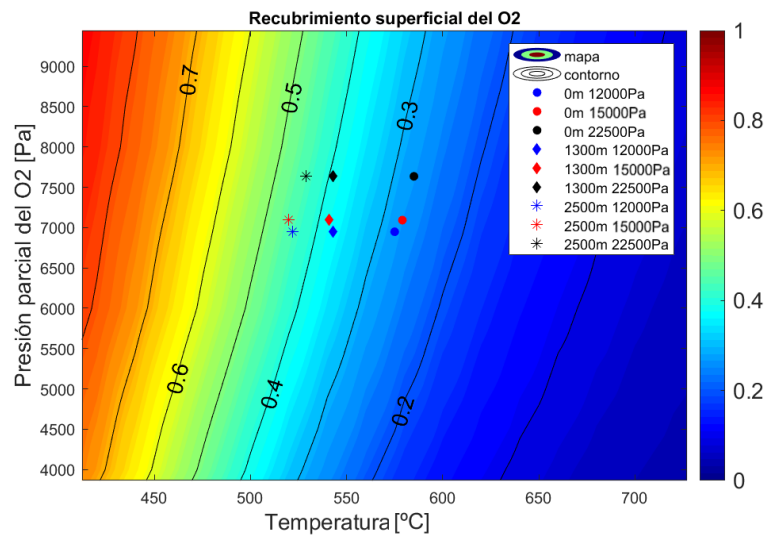


Figura 35. Recubrimiento superficial del O₂ en los ensayos si el perfil de temperatura a la entrada del DPF en 1300 y 2500m fuese el mismo que en 0m

Dado que la forma de la isoterma es muy vertical, se observa un mayor efecto por parte de la temperatura en el recubrimiento superficial del O₂ que por parte de la presión parcial. Para probar si esto es cierto, y realmente estos parámetros son los causantes de la ralentización de la regeneración, se han realizado diferentes simulaciones con el modelo.

6.1. Efecto de la presión parcial del O₂

La presión parcial del O₂ a la entrada del DPF se reduce con el incremento de altitud, tal y como observa en la figura 36:

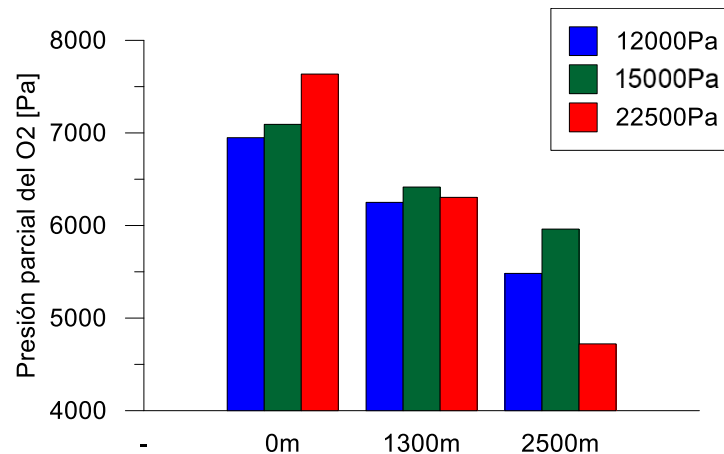


Figura 36. Presión parcial del O₂ en los ensayos

Esta reducción de la presión parcial debería tener efectos negativos sobre la tasa de oxidación del hollín según lo visto en la ecuación del transporte de especies químicas (ecuación 3); sin embargo, debido a que se ha observado un efecto poco notorio sobre el recubrimiento superficial del O₂, es posible que finalmente su impacto en velocidad de la regeneración no sea tan considerable.

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

$$u_w \frac{\partial(X_{O_2})}{\partial z} = -(S_{p,ext} + \eta_{int,O_2} S_{p,int}) k_{O_2} \alpha_{O_2} \frac{k_{s_{O_2}} p_{O_2}}{1+k_{s_{O_2}} p_{O_2}} \quad (19)$$

Tras simular con el modelo los ensayos de 1300m y 2500m sustituyendo la presión parcial del O2 real por la observada en los ensayos de 0m, se obtienen los siguientes resultados:

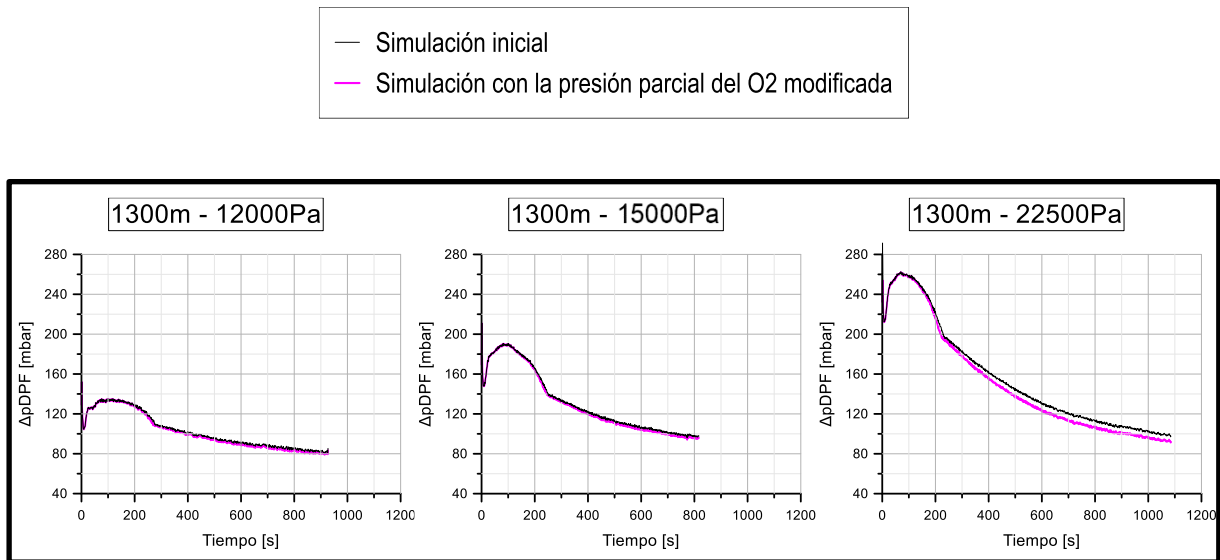


Figura 37. Efecto de la presión parcial del O2 en la caída de presión a 1300m

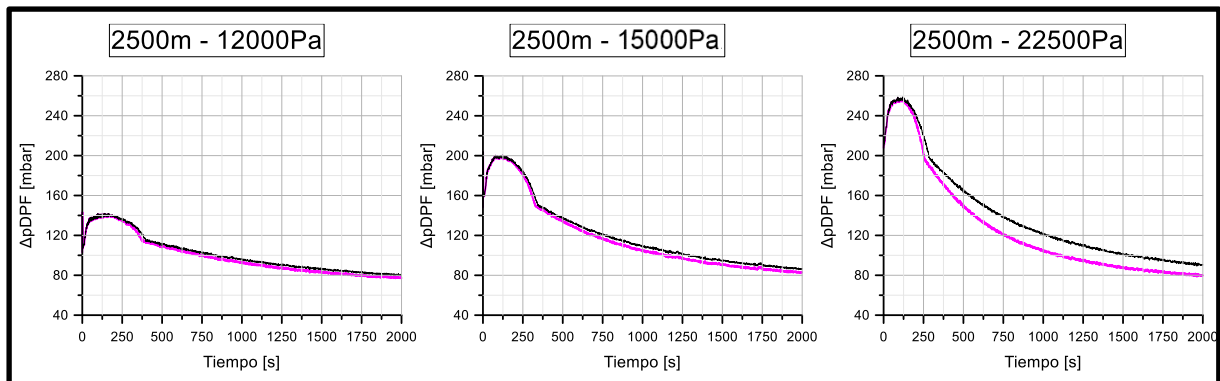


Figura 38. Efecto de la presión parcial del O2 en la caída de presión a 2500m

Como puede verse, la repercusión de la presión parcial del O2 en la caída de presión del DPF es reducida, esto significa que la reacción está saturada de oxígeno cuando la carga másica del DPF y la altura no es muy elevada. Sin embargo, a medida que la carga y la altitud aumentan, la repercusión de este parámetro cada vez es mayor, pues llega un punto en que se produce un déficit de O2 durante la reacción debido a la reducida concentración de este gas y a la gran cantidad de hollín por quemar.

En conclusión, la presión parcial del oxígeno sí afecta a la velocidad de la regeneración activa del DPF, pero solo lo hace cuando la altura de conducción y la carga másica del DPF aumentan considerablemente.

6.2. Efecto de la temperatura

La temperatura de los gases de escape también sufre cambios con el incremento de altitud, ya que el perfil de temperatura a la entrada del DPF varía. Se observa como a 0m (figura 39), la temperatura a la entrada es mayor que a 1300m (figura 40) y 2500m (figura 41), y lo mismo se observa con la temperatura de salida.

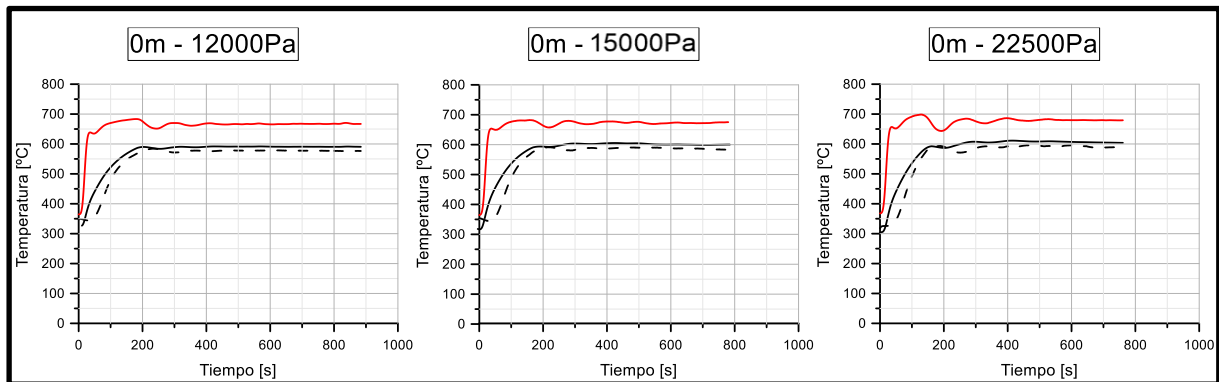
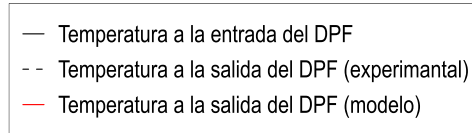


Figura 39. Perfiles de temperatura a 0m

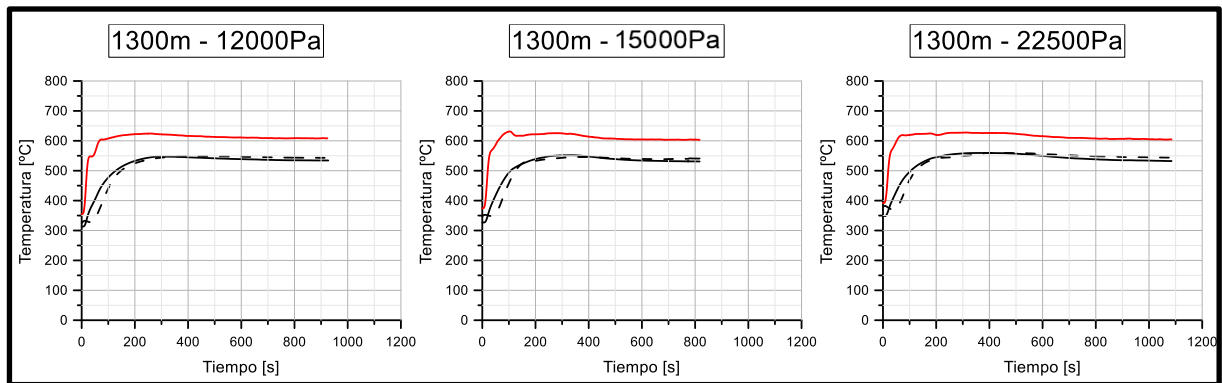


Figura 40. Perfiles de temperatura a 1300m

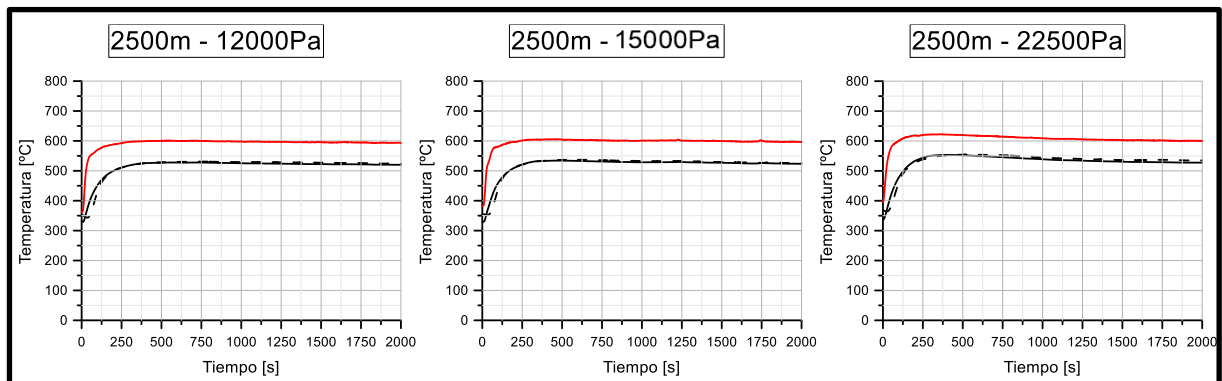


Figura 41. Perfiles de temperatura a 2500m

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

Para estudiar el efecto de la temperatura sobre la regeneración, se simularon los ensayos de 1300m y 2500m sustituyendo sus perfiles de temperatura de entrada al DPF por los de los ensayos de 0m con la misma caída de presión inicial (figura 39). Los resultados fueron los siguientes:

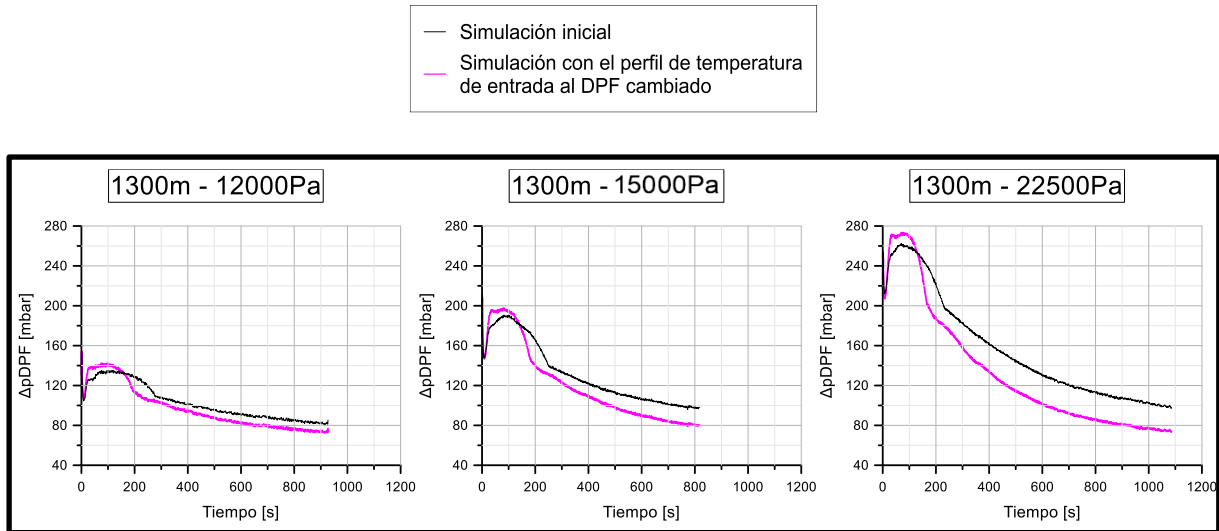


Figura 42. Efecto de la temperatura en la caída de presión a 1300m

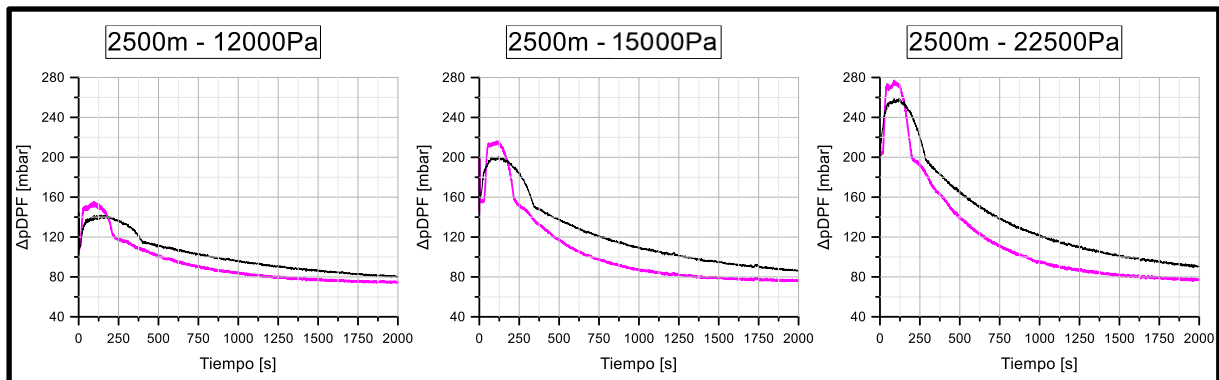


Figura 43. Efecto de la temperatura en la caída de presión a 2500m

Se observa que, como se hipotetizó en el inicio del apartado, los efectos de la temperatura sobre la regeneración son mucho más notorios; ya que para todos los estados de carga se incrementa la velocidad de la reacción y su eficacia, aumentando la pendiente de la caída de presión y reduciendo su valor final.

6.3. Efecto combinado de la presión parcial y la temperatura

Tras estudiar el efecto individual de la temperatura y de la presión parcial del O₂ sobre la velocidad de la regeneración, puede afirmarse que la temperatura afecta mucho a la tasa de oxidación del hollín indistintamente de la carga inicial del DPF, debido a la fuerte relación de este parámetro con el recubrimiento superficial del O₂. Por el contrario, el efecto de la presión parcial sobre la velocidad es mucho más dependiente de la carga y de la altitud, ya que su impacto solo es considerable en los ensayos en los que se produce déficit de O₂.

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

Por otra parte, cuando se estudia el efecto conjunto de ambos parámetros los resultados son los siguientes:

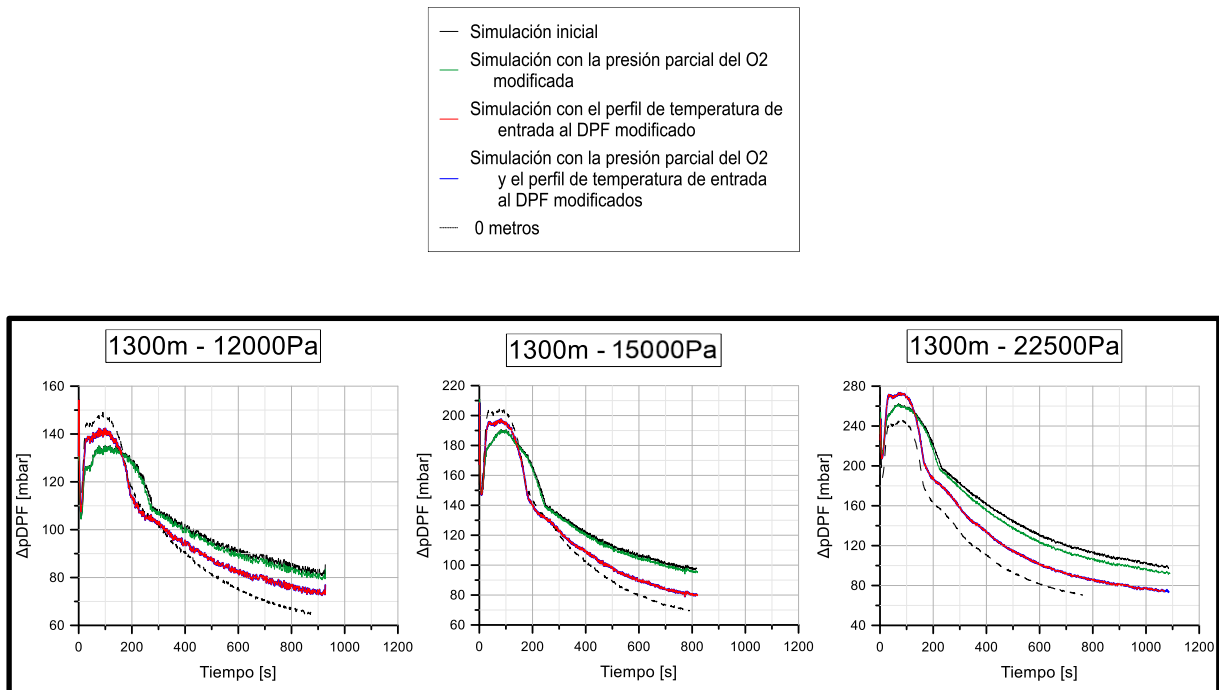


Figura 44. Comparación del efecto de la presión parcial y de la temperatura en la caída de presión a 1300m

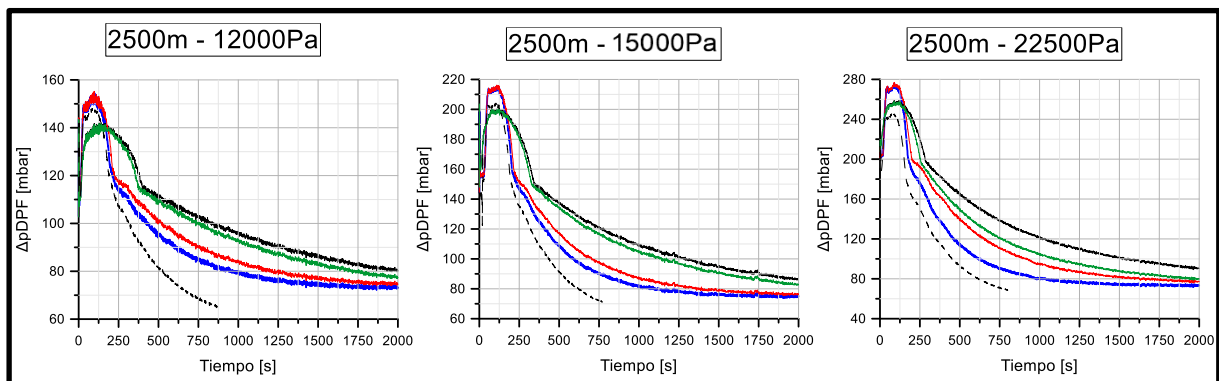


Figura 45. Comparación del efecto de la presión parcial y de la temperatura en la caída de presión a 2500m

En estas figuras se compara el efecto en altitud de ambos parámetros sobre la caída de presión del DPF, tanto de manera individual como conjunta, y también se confrontan los resultados con las simulaciones de 0m.

Puede observarse como en 1300m (figura 44) la ralentización de la oxidación del hollín y su pérdida de eficacia se debe principalmente al efecto individual de la temperatura de los gases, ya que la evolución de la caída de presión en la simulación en la que se utiliza el perfil de temperaturas de 0m (curva roja) es muy cercana a la simulación de 0m (curva negra discontinua); además, esta simulación no presenta diferencias apreciables con la que tiene en cuenta ambos parámetros (curva azul), lo cual refuerza la conclusión expuesta.

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

Por su parte, en 2500m (figura 45), la presión parcial del O₂ sí afecta individual y conjuntamente a la regeneración del DPF. De manera individual, el efecto de la presión parcial del O₂ sobre la caída de presión del DPF (curva verde), se debe a la reducción de la concentración del O₂ en altitud; sin embargo, este impacto es reducido. Contrariamente, cuando este parámetro actúa junto con la temperatura (curva azul) su efecto es mucho mayor, pues ambos parámetros son sinérgicos entre ellos, llegando al punto en que las simulaciones que tienen en cuenta ambos parámetros incrementan mucho la tasa de oxidación de hollín, alcanzando valores mucho más cercanos a los presentes en 0m (curva negra discontinua).

7. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este trabajo de final de grado se ha caracterizado la regeneración activa del DPF atendiendo a los efectos que se producen cuando la caída de presión del filtro y la altitud de conducción aumenta. Para ello se han contrapuesto resultados experimentales y simulaciones de un modelo del sistema.

Los resultados experimentales se han obtenidos en una sala de ensayos mediante el motor K9K EURO6d-temp. Durante estos ensayos, la estrategia de regeneración se basó en el uso de post-inyecciones, las cuales tuvieron como objetivo que parte del combustible no se oxidase en la cámara de combustión, sino que se quemase en el DOC, para así aumentar la temperatura de entrada en el DPF. Los ensayos se dieron por terminados cuando la derivada de la caída de presión se mantuvo oscilante entre el $\pm 5\%$ de su máximo durante 50 segundos, o bien, cuando se superaron los 2000 segundos de ensayo.

Por otra parte, los datos experimentales permitieron la calibración de un modelo del sistema; en concreto, el modelo utilizado forma parte de VEMOD, un software proporcionado por el CMT. El uso del modelo ha permitido abaratar los costes del estudio y estudiar situaciones cuya adquisición experimental sería complicada e imprecisa.

Mediante la comparación de los resultados recabados por ambas herramientas, se han definido las etapas de la regeneración. En primer lugar, por el aumento de la temperatura a la salida del DOC, se produce la etapa de precalentamiento. Seguidamente, la reactividad aumenta hasta alcanzar su máximo. Finalmente, la reactividad se reduce progresivamente en la etapa de oxidación tardía, hasta que la caída de presión se estabiliza.

En cuanto al efecto de la caída de presión en el DPF sobre la regeneración, se ha observado como, con el aumento de dicho parámetro al inicio, la tasa de oxidación del hollín aumenta. Ya que, con el incremento de la carga inicial del filtro, la caída de presión del DPF cada vez tiene pendientes más acusadas (figura 46), y las duraciones de las fases se reducen cada vez más (figura 47 y tabla 23).

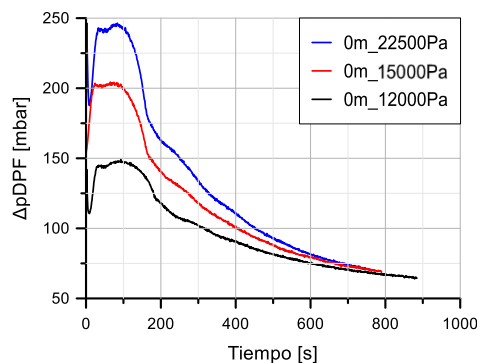


Figura 46. Caída de presión al incrementar la carga inicial en los ensayos de 0m

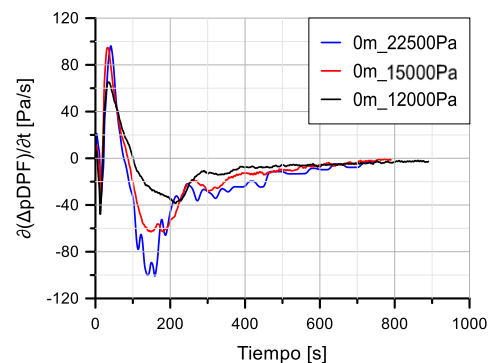


Figura 47. Derivada de la caída de presión al aumentar la carga inicial en los ensayos de 0m

	0m		
	12000Pa	15000Pa	22500Pa
Etapas de precalentamiento (s)	99	87	64
Alcance de la máxima reactividad (s)	106	83	73
Oxidación tardía (s)	679,1	610,2	624,2
Total (s)	884,1	780,2	761,2

Tabla 23. Duración de las etapas de la regeneración en los ensayos de 0m

Caracterización de la regeneración activa de filtros de partículas Diesel de flujo de pared a elevada altitud de conducción

Por el contrario, con el aumento de la altura se ha visto una ralentización de la regeneración. Cada vez el hollín se quema más lentamente, dando lugar a tiempos de ensayo mayores (tabla 24). Además, el máximo de la caída de presión y su diferencia porcentual, también se ven menguados con el incremento de la altitud de conducción. Esta reducción de la reactividad alcanza su máxima notoriedad en 2500m, pues la segunda fase de la regeneración es prácticamente inexistente, debido a que el punto de máxima reactividad es muy poco significativo en contraposición con la reactividad del resto del ensayo.

Ensayos		Tiempo total [s]
0m	12000Pa	884
	15000Pa	780
	22500Pa	761
1300m	12000Pa	933
	15000Pa	817
	22500Pa	1085
2500m	12000Pa	>2000
	15000Pa	>2000
	22500Pa	>2000

Tabla 24. Tiempo total de ensayo en los ensayos de 0m, 1300m y 2500m

Este empeoramiento de la regeneración del DPF se debe principalmente a la reducción de la temperatura de los gases (tabla 25) y de la presión parcial del O₂ con el aumento de la altitud; ya que estos dos parámetros están fuertemente relacionados con recubrimiento superficial del O₂, el cual condiciona la oxidación del hollín.

Ensayo		Temperatura a la entrada del DPF [°C]
0m	12000Pa	666
	15000Pa	673
	22500Pa	679
1300m	12000Pa	608
	15000Pa	611
	22500Pa	614
2550m	12000Pa	595
	15000Pa	598
	22500Pa	600

Tabla 25. Temperatura de los gases a la entrada del DPF

Esta afirmación inicialmente hipotetizada, ha sido finalmente probada con la realización de simulaciones, en las cuales se modificó la presión parcial del O₂ y el perfil de temperatura a la entrada del DPF. Gracias a estas simulaciones se ha concluido que la presión parcial del oxígeno sí afecta a la velocidad de la regeneración, pero solo cuando la altitud y la carga másica del DPF aumentan mucho; mientras que la temperatura afecta de manera más notoria y en todos los ensayos; además, también se ha comprobado que ambos parámetros tienen un efecto sinérgico cuando actúan de manera conjunta.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Rovira de Antonio A., Muñoz Domínguez M. Generalidades de los motores de combustión interna alternativos. En: Motores de combustión interna. 1st ed. Madrid: UNED; 2015. 20-79.
2. Gobierno de España: Ministerio de educación y formación profesional [Internet]. Madrid: Ministerio de educación y formación profesional. Descartes 2D: Aplicación mecánica. Mecanismo biela-manivela [Consultado 15 Abril 2020].
Disponible en: <http://recursostic.educacion.es/descartes/web/index.html>
3. Heywood J. Internal Combustion Engine Fundamentals. 1st ed. McGraw-Hill Education; 1988.
4. Arregle J., Payri Marín R., Serrano Cruz J. R., Galindo Lucas J. Procesos y Tecnología de Máquinas y Motores Térmicos. 1ª ed. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2002.
5. Payri F., Desantes J. M. Emisiones contaminantes. En: Motores de combustión interna alternativos. 1ª ed. Madrid: Reverte; 2011. 416-43.
6. Rovira de Antonio A., Muñoz Domínguez M. El proceso de combustión en los MEP y MEC: Emisiones contaminantes. En: Motores de combustión interna. 1st ed. Madrid: UNED; 2015. 80-131.
7. Bereit A. E., Fuller E., Parker H. Gases. Moléculas y masas. En: Sistemas químicos. 1st ed. Barcelona: Reverte; 1966. 84-134.
8. ECHA: European Chemical Agency [Internet]. Helsinki: Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas; c2007-2020. Substance Information [Consultado 24 Abril 2020].
Disponible en: <https://echa.europa.eu/substance-information/-/substanceinfo/100.028.359>
9. Gobierno de España: Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico [Internet]. Madrid: Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. NOX (ÓXIDOS DE NITRÓGENO) [Consultado 25 Abril 2020].
Disponible en: <http://www.prtr-es.es/NOx-oxidos-de-nitrogeno,15595,11,2007.html>
10. Generalitat de Catalunya: Departamento de territorio y sostenibilidad [Internet]. Barcelona: Generalitat de Catalunya. ¿Qué es el ozono troposférico? [Consultado 25 Abril 2020].
Disponible en: http://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/atmosfera/qualitat_de_laire/_avaluacio/campanya_ozo/que_es_lozo_troposferic/
11. Reglamento (CE) nº 2017/1347 del Parlamento Europeo y del Consejo sobre la homologación de tipo de vehículos de motor con respecto a las emisiones de los vehículos ligeros de pasajeros y comerciales (Euro 5 y Euro 6) y sobre el acceso a la reparación de vehículos y información de mantenimiento. Bruselas: Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. 2017
12. Piqueras Cabrera P. Fundamentals of exhaust aftertreatment systems in ice: Legislation framework and challenges in automotive emissions.[diapositiva].Roma: Università Roma Tre;2018. 44 diapositivas

13. Delphi Technologies. Worldwide emissions standards: Passenger cars and light duty vehicles [Internet]. Dublín: Delphi Technologies [consultado 25 Abril 2020]. Disponible en: <https://d2ou7ivda5raf2.cloudfront.net/sites/default/files/inline-files/booklet%20emission%20complete%20%20PC18.pdf>
14. Motor Pasión [Internet]. México: Motor Pasión. Nuevas etiquetas de combustible diésel B7, B10 y gasolina E5, E10: así te afectará el cambio [Consultado 15 Abril 2020]. Disponible en: <https://www.motorpasion.com/industria/nuevas-etiquetas-combustible-diesel-b7-b10-gasolina-e5-e10-asi-te-afectara-cambio>
15. Wikipedia: WLTP [Internet]. [consultado 15 Abril 2020]. San Francisco: Wikipedia. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/WLTP#/media/Archivo:Class_3b.svg
16. Liu J., Yao A., Yao C. Effects of diesel injection pressure on the performance and emissions of a HD common-rail diesel engine fueled with diesel-methanol dual fuel. *Fuel*. 2015; 140: 192-200.
17. Payri F., Broatch A., Salavert J. M., Martín J. Investigation of Diesel combustion using multiple injection strategies for idling after cold start of passenger-car engines. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2010; 34 (7): 857-865.
18. Zheng Z., Liu C., Tian X., Zhang X. Numerical study of the effect of pistón top contour on GDI engine performance under catalyst heating mode. *Fuel*. 2015; 157: 64-72.
19. Rodríguez J. C, Mantenimiento de sistemas auxiliares del motor de ciclo Otto. 1ª ed. Internet: IC editorial; 2018. [consultado el 27 de abril de 2020]. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=0AVbav1RIMEC&pg=PT116#v=onepage&q&f=false>
20. Campos D. Estudio de las emisiones de escape en motores de combustión interna alternativos utilizando diferentes sistemas de control de contaminantes [tesis doctoral]. Valencia: Univèrsitat politècnica de València; 2016.
21. Li J., Chang H., Ma I., Hao J., Yang R. T. Low-temperature selective catalytic reduction of NOx with NH3 over metal oxide and zeolite catalyst – A review. *Catalysis Today*. 2011; 175(1). 147-156.
22. Guan B., Zhan R., Lin H., Huang Z. Review of state of the art technologies of selective catalytic reduction of NOx from diesel engine exhaust. *Applied Thermal Engineering*. 2014; 66(1–2) (2014). 395-414.
23. Sanchis E. J. Modelado de la oxidación del hollín en filtros de partículas diésel [tesis doctoral]. Valencia: Univèrsitat politècnica de València; 2019.
24. Yang J., Stewart M., Maupin G., Herling D., Zelenyuk A. Single wall diesel particulate filter (DPF) filtration efficiency studies using laboratory generated particles. *Chemical Engineering Science*. 2009; 64 (8). 1625–1634.
25. García O. Análisis teórico experimental de la arquitectura pre-turbo en sistemas de postratamiento en MCI [tesis doctoral]. Valencia: Univèrsitat politècnica de València; 2014
26. Beatrice C., Di Iorio S., Guido C., Napolitano P. Detailed characterization of particulate emissions of an automotive catalyzed DPF using actual regeneration strategies. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2012; 39. 45–53.

27. Parks J., Huff S., Kass M., Storey J. Characterization of in-cylinder techniques for thermal management of diesel aftertreatment. SAE Technical Paper. 2007; 007-01-3997.
28. Ohno K., Taoka N., Ninomiya T., Sungtae H., Kojima M., Komori T. SiC Diesel particulate filter application to electric heater system. SAE Technical Paper. 1999; 1999-01-0464.
29. Gardner T., Yetkin A., Shotwell R., Kotrba A., Gysling H., Mustafa Z., Holroyd J. Evaluation of a DPF regeneration system and DOC performance using secondary fuelinjection. SAE Technical Paper. 2009; 2009-01-2884.
30. Kandylas I.P., Koltsakis G.C. NO₂-assisted regeneration of diesel particulate filters: a modeling study. Industrial and Engineering Chemistry Research. 2002; 41. 2115-2123.
31. Hauff K., Tuttlies U., Eigenberger G., Nieken U. Platinum oxide formation and reduction during NO oxidation on a diesel oxidation catalyst—Experimental results. Applied Catalysis B: Environmental. 2012; 123. 107–116.
32. Giménez Mañogil J., Quiles Díaz S., Guillén Hurtado N., García García A. Catalyzed Particulate Filter Regeneration by Platinum Versus Noble Metal-Free Catalysts: From Principles to Real Application. Topics in Catalysis. 2017; 60 (1-2). 2–12.
33. Payri F., Arnau, F. J., Piqueras P., Ruiz, M. J. Lumped aproach for flow-through and wall-flow monolithic reactors modelling for real-time automotive applications. SAE Technical Paper. 2018; 2018-01-0954
34. Macián V., Serrano J. R., Piqueras P., Sanchis E. J. Internal pore difusión and adsorption impacto in the soot oxidation in wall-flow particulate filters. Energy. 2019; 179. 407-241.
35. Serrano J.R., Climent H., Piqueras P., Angiolini E. Filtration modelling in wall-flow particulate filters of low soot penetration thickness. Energy. 2016; 112, 883–898.
36. Koltsakis G.C., Stamatelos A.M. Modeling thermal regeneration of wall-flow diesel particulate filters: Reactors, kinetics and catalysis. AIChE Journal. 1996; 42:6, 1662–1672.
37. Masoudi M. Hydrodynamics of Diesel Particulate Filters. SAE Technical Paper. 2002; 2002-01-1016.
38. Konstandopoulos A.G., Kostoglou M., Skaperdas E., Papaioannou E. Fundamental Studies of Diesel Particulate Filters: Transient Loading, Regeneration and Aging. SAE Technical Paper. 2001; 2000-01-1016.
39. Konstandopoulos A.G., Johnson J.H. Wall-Flow Diesel Particulate Filters -Their Pressure Drop and Collection Efficiency. SAE Technical Paper. 1989; 890405.
40. Boger T., Rose D., Tilgner I.C., Heibel A.K. Regeneration strategies for an enhanced thermal management of oxide diesel particulate filters. SAE International Journal of Fuels and Lubricants. 2009; 1(1), 162–172.
41. Serrano Cruz JR., Arnau Martínez FJ., Piqueras Cabrera P., Garcia Afonso O. Packed bed of spherical particles approach for pressure drop prediction in wall-flow DPFs (diesel particulate filters) under soot loading conditions. Energy. 2013; 58, 644-654. doi: 10.1016/j.energy.2013.05.051

42. Messerer A., Niessner H. y Pöschl U. Comprehensive kinetic characterization of the oxidation and gasification of model and real diesel soot by nitrogen oxides and oxygen under engine exhaust conditions: Measurement, Langmuir-Hinshelwood, and Arrhenius parameters. *Carbon*. 2006; 44, 307–324.

PRESUPUESTO

1. CONSIDERACIONES PREVIAS

1.1. Introducción

En el presente escrito se presupuestan todas las actividades que han sido desempeñadas a lo largo de la memoria, con el objetivo de estimar el costo económico del estudio. Para ello, se exponen todos los recursos humanos que han participado en el proyecto, los recursos amortizables, y se muestran todas las partes típicamente presentes en este tipo de manuscritos: cuadros de precios, presupuestos parciales y resumen del presupuesto.

1.2. Recursos humanos

A continuación se introducen los interventores de este proyecto, y se explica su papel dentro del ámbito de la ingeniería, así como en el marco de este estudio:

- ❖ Ingeniero Doctor: director del proyecto. Este interventor fue el encargado de definir los objetivos del proyecto en reuniones privadas con el grupo Renault. También controla y examina las actividades desempeñadas a lo largo del proyecto por el resto de los interventores.
- ❖ Ingeniero Superior: estudiante de doctorado. Esta persona se encarga de tutorizar al autor del proyecto y brindarle su ayuda cuando es necesario. Además, se encarga de otras actividades más complejas técnicamente, las cuales son necesarias para el desarrollo del proyecto, tales como la validación teórica del modelo.
- ❖ Ingeniero Superior: técnico de ensayos. Este ingeniero superior está presente en la sala de ensayos durante la realización de los mismos; se trata del profesional que mejor conoce el motor utilizado, por lo cual su presencia es muy necesaria. No solo supervisa los ensayos, sino que sabe como actuar en el caso de que algún elemento de la sala sufra algún problema.
- ❖ Ingeniero Júnior: autor de los documentos expuestos. Su labor consiste en satisfacer las metas del estudio y, finalmente, documentar todas las actividades que han sido desempeñadas para conseguirlo.

El salario de los interventores en una empresa de iniciativa privada sería el siguiente:

	Código	Precio [€/h]
Ingeniero Doctor: director del proyecto	ID	50
Ingeniero Superior: estudiante de doctorado	ISD	35
Ingeniero Superior: técnico de ensayos	IST	35
Ingeniero Júnior: autor de los documentos expuestos	IJ	20

1.3. Bienes amortizables

Los recursos y softwares amortizables son los siguientes:

- ❖ Equipo de ensayos: se consideran las salas de ensayos caracterizadas a lo largo de apartado 3.1 de la memoria.
- ❖ Ordenadores: utilizados por el director del proyecto, el ingeniero superior estudiante de doctorado, y el ingeniero júnior.
- ❖ Licencia de MATLAB Academic Use: licencia utilizada por el ingeniero superior estudiante de doctorado.
- ❖ Licencia de Matlab Student: licencia utilizada por el ingeniero júnior.
- ❖ Licencia de Microsoft 365: licencia utilizada por el director del proyecto, el ingeniero superior estudiante de doctorado, y el ingeniero júnior.
- ❖ Material de oficina: papel, bolígrafos, u otros materiales típicos en una oficina.

Debido a la tipología de estos recursos, es necesario especificar su costo inicial, su periodo de amortización y su amortización anual:

	Código	Coste [€]	Periodo de amortización	Amortización anual [€/año]	Amortización mensual [€/mes]
Equipo de ensayos	E.E	400000	10 años	40000	3333,3
Ordenador	O	800	5 años	160	13,3
Licencia de MATLAB Academic Use	L.M.A	250	1 año	250	20,8
Licencia de Matlab Student	L.M.S	69	1 año	69	5,8
Licencia de Microsoft 365	L.M.365	69	1 año	69	5,8
Material de oficina	M.O	25	6 meses	50	4,2

1.4. Definición de las unidades de obra

El presupuesto se ha dividido en diferentes capítulos según la naturaleza de las actividades que los componen. A continuación, se presentan todos los capítulos, así como las unidades de obra que los consolidan; a su vez, estas últimas están acompañadas de una breve descripción:

1.4.1. Actividades previas

- ❖ U.O.1. Definición del proyecto: Esta unidad de obra atiende a todas las horas dedicadas a definir los objetivos del TFG. Una vez fueron dictaminadas estas metas, el director del proyecto y el ingeniero superior le indicaron al autor del proyecto todas las actividades a realizar.
- ❖ U.O.2. Formación teórico-práctica: En esta U.O se incluyen las horas dedicadas a la adquisición de conocimientos teóricos y prácticos. Por su parte, la formación teórica se

realizó mediante la consulta de la bibliografía. Mientras que la formación práctica, consistió en la toma de contacto con el Software y las rutinas a utilizar.

Esta labor fue realizada, obviamente, por el autor del proyecto, aunque también se tiene en cuenta al ingeniero superior por su continua ayuda a lo largo de dicha formación.

1.4.2. Desarrollo de la metodología

- ❖ U.O.3. Realización de los ensayos: Tal y como se explica en el apartado 3, los datos experimentales se obtuvieron gracias a las pruebas realizadas en las salas 5 y 6 del edificio 8P, en concreto se realizaron un total de 12 ensayos, de los cuales se seleccionaron los 9 mejores. En esta unidad de obra se tienen en cuenta todos los costes no amortizables asociados a la realización de estos ensayos.

Cabe destacar que los consumibles se consideran como costes directos complementarios.

- ❖ U.O.4. Procesado de los datos experimentales: Se abarcan las horas destinadas a procesar los datos extraídos de los ensayos para obtener información manejable y útil. Así pues, se tiene en consideración el postprocesado de los datos, el cálculo de derivadas, la eliminación de ruido de las señales, etc.
- ❖ U.O.5. Validación del modelo: En esta U.O se tienen en cuenta las horas dedicadas a validar el modelo, a corregir posibles errores, y a optimizar algunos otros aspectos para el presente estudio. Esta actividad fue llevada a cabo principalmente por el ingeniero superior; sin embargo, también tiene en consideración el tiempo destinado a diversas reuniones entre el doctor, el ingeniero superior y el ingeniero Jr.
- ❖ U.O.6. Análisis de los resultados y calibración del modelo: Como ya se adelantó previamente, una de las actividades que mayor tiempo supusieron fue la calibración. En esta unidad se tiene en consideración el tiempo dedicado a calibrar el modelo de regeneración en base a los datos experimentales recabados durante los ensayos.

1.4.3. Redacción del trabajo de final de grado

- ❖ U.O.7. Redacción del TFG: Una vez se desarrolló por completo toda la metodología, se estudiaron los resultados, se extrajeron conclusiones y se consolidó el presente documento.

Esta U.O. también atiende al tiempo destinado a las diferentes reuniones, en las cuales, el doctor y el ingeniero superior han tutorizado al autor del estudio.

1.4.4. Unidades adicionales

- ❖ U.O.8. Amortización de los recursos y equipos: La amortización de los diferentes bienes se ha contabilizado como una unidad adicional, cuya unidad es el número de meses.

2. DESGLOSE DEL PRESUPUESTO Y PRESENTACIÓN DE DOCUMENTOS

Todos los documentos del presupuesto han sido elaborados mediante el programa Arquímedes:

- ❖ Justificación de precios: Mano de obra.
- ❖ Justificación de precios: Bienes amortizables.
- ❖ Justificación de precios: Unidades de obra.
- ❖ Cuadro de precios nº1.
- ❖ Cuadro de precios nº2.
- ❖ Mediciones.
- ❖ Presupuestos parciales.
- ❖ Resumen del presupuesto.

Estos documentos se presentan en las siguientes páginas según el orden dicho:

1. Definición del proyecto y formación teórico-práctica

Código	Ud	Descripción		Total
U.O.1	h	Definición del proyecto		
	1,000 h	Ingeniero Doctor	50,000 €	50,00 €
	1,000 h	Ingeniero superior: estudiante de doctorado	35,000 €	35,00 €
	1,000 h	Ingeniero Júnior	20,000 €	20,00 €
		3,000 % Costes indirectos	105,000 €	3,15 €
			Precio total por h	108,15 €
U.O.2	h	Formación teórico-práctica		
	0,250 h	Ingeniero superior: estudiante de doctorado	35,000 €	8,75 €
	1,000 h	Ingeniero Júnior	20,000 €	20,00 €
		3,000 % Costes indirectos	28,750 €	0,86 €
			Precio total por h	29,61 €

2. Desarrollo de la metodología

Código	Ud	Descripción			Total
U.O.3	h	Realización de los ensayos			
	1,000	h	Ingeniero superior: estudiante de doctorado	35,000 €	35,00 €
	1,000	h	Ingeniero Júnior	20,000 €	20,00 €
	1,000	h	Ingeniero superior: técnico de ensayos	35,000 €	35,00 €
	5,000	%	Costes Directos complementarios	90,000 €	4,50 €
			3,000 % Costes indirectos	94,500 €	2,84 €
			Precio total por h		97,34 €
U.O.4	h	Procesado de los datos experimentales			
	0,250	h	Ingeniero superior: estudiante de doctorado	35,000 €	8,75 €
	1,000	h	Ingeniero Júnior	20,000 €	20,00 €
			3,000 % Costes indirectos	28,750 €	0,86 €
			Precio total por h		29,61 €
U.O.5	h	Validación del modelo			
	0,100	h	Ingeniero Doctor	50,000 €	5,00 €
	1,000	h	Ingeniero superior: estudiante de doctorado	35,000 €	35,00 €
	0,100	h	Ingeniero Júnior	20,000 €	2,00 €
			3,000 % Costes indirectos	42,000 €	1,26 €
			Precio total por h		43,26 €
U.O.6	h	Análisis de los resultados y calibración del modelo			
	0,100	h	Ingeniero Doctor	50,000 €	5,00 €
	0,500	h	Ingeniero superior: estudiante de doctorado	35,000 €	17,50 €
	1,000	h	Ingeniero Júnior	20,000 €	20,00 €
			3,000 % Costes indirectos	42,500 €	1,28 €
			Precio total por h		43,78 €

3. Redacción del trabajo de final de grado

Código	Ud	Descripción		Total
U.O.7	h	Redacción del TFG		
	0,100 h	Ingeniero Doctor	50,000 €	5,00 €
	0,250 h	Ingeniero superior: estudiante de doctorado	35,000 €	8,75 €
	1,000 h	Ingeniero Júnior	20,000 €	20,00 €
		3,000 % Costes indirectos	33,750 €	1,01 €
			Precio total por h	34,76 €

4. Amortización de los recursos y equipos

Código	Ud	Descripción		Total
U.O.8	mes	Amortización de los recursos y equipos		
1,000	m...	Equipo de ensayos	3.333,300 €	3.333,30 €
3,000	m...	Ordenadores	13,333 €	40,00 €
1,000	m...	Licencia de MATLAB Academic Use	20,800 €	20,80 €
1,000	m...	Licencia de MATLAB Student	5,800 €	5,80 €
3,000	m...	Licencia de Microsoft 365	5,800 €	17,40 €
1,000	m...	Material de oficina	4,200 €	4,20 €
	3,000 %	Costes indirectos	3.421,500 €	102,65 €
			Precio total por mes	3.524,15 €

Nº	Designación	Importe	
		En cifra (euros)	En letra (euros)
	1. Definición del proyecto y formación teórico-práctica		
U.O.1	h Definición del proyecto	108,15 €	CIENTO OCHO EUROS CON QUINCE CÉNTIMOS
U.O.2	h Formación teórico-práctica	29,61 €	VEINTINUEVE EUROS CON SESENTA Y UN CÉNTIMOS
	2. Desarrollo de la metodología		
U.O.3	h Realización de los ensayos	97,34 €	NOVENTA Y SIETE EUROS CON TREINTA Y CUATRO CÉNTIMOS
U.O.4	h Procesado de los datos experimentales	29,61 €	VEINTINUEVE EUROS CON SESENTA Y UN CÉNTIMOS
U.O.5	h Validación del modelo	43,26 €	CUARENTA Y TRES EUROS CON VEINTISEIS CÉNTIMOS
U.O.6	h Análisis de los resultados y calibración del modelo	43,78 €	CUARENTA Y TRES EUROS CON SETENTA Y OCHO CÉNTIMOS
	3. Redacción del trabajo de final de grado		
U.O.7	h Redacción del TFG	34,76 €	TREINTA Y CUATRO EUROS CON SETENTA Y SEIS CÉNTIMOS
	4. Amortización de los recursos y equipos		
U.O.8	mes Amortización de los recursos y equipos	3.524,15 €	TRES MIL QUINIENTOS VEINTICUATRO EUROS CON QUINCE CÉNTIMOS

Código	Ud	Descripción		
U.O.1	h	Definición del proyecto		
		Mano de obra		105,00 €
		3 % Costes indirectos		3,15 €
			Total por h	108,15
U.O.2	h	Son CIENTO OCHO EUROS CON QUINCE CÉNTIMOS por h Formación teórico-práctica		
		Mano de obra		28,75 €
		3 % Costes indirectos		0,86 €
			Total por h	29,61
U.O.3	h	Son VEINTINUEVE EUROS CON SESENTA Y UN CÉNTIMOS por h Realización de los ensayos		
		Mano de obra		90,00 €
		Medios auxiliares		4,50 €
		3 % Costes indirectos		2,84 €
			Total por h	97,34
U.O.4	h	Son NOVENTA Y SIETE EUROS CON TREINTA Y CUATRO CÉNTIMOS por h Procesado de los datos experimentales		
		Mano de obra		28,75 €
		3 % Costes indirectos		0,86 €
			Total por h	29,61
U.O.5	h	Son VEINTINUEVE EUROS CON SESENTA Y UN CÉNTIMOS por h Validación del modelo		
		Mano de obra		42,00 €
		3 % Costes indirectos		1,26 €
			Total por h	43,26
U.O.6	h	Son CUARENTA Y TRES EUROS CON VEINTISEIS CÉNTIMOS por h Análisis de los resultados y calibración del modelo		
		Mano de obra		42,50 €
		3 % Costes indirectos		1,28 €
			Total por h	43,78
U.O.7	h	Son CUARENTA Y TRES EUROS CON SETENTA Y OCHO CÉNTIMOS por h Redacción del TFG		
		Mano de obra		33,75 €
		3 % Costes indirectos		1,01 €
			Total por h	34,76
U.O.8	mes	Son TREINTA Y CUATRO EUROS CON SETENTA Y SEIS CÉNTIMOS por h Amortización de los recursos y equipos		
		Sin descomposición		3.421,50 €
		3 % Costes indirectos		102,65 €
			Total por mes	3.524,15
		Son TRES MIL QUINIENTOS VEINTICUATRO EUROS CON QUINCE CÉNTIMOS por mes		

1. Definición del proyecto y formación teórico-práctica

Nº	Ud	Descripción	Medición	
U.O.1	H	Definición del proyecto		
			Total h :	10,000
U.O.2	H	Formación teórico-práctica		
			Total h :	70,000

2. Desarrollo de la metodología

Nº	Ud	Descripción	Medición	
U.O.3	H	Realización de los ensayos		
			Total h :	12,000
U.O.4	H	Procesado de los datos experimentales		
			Total h :	50,000
U.O.5	H	Validación del modelo		
			Total h :	30,000
U.O.6	H	Análisis de los resultados y calibración del modelo		
			Total h :	100,000

3. Redacción del trabajo de final de grado

Nº	Ud	Descripción	Medición
U.O.7	H	Redacción del TFG	
Total h :			75,000

4. Amortización de los recursos y equipos

Nº	Ud	Descripción	Medición
U.O.8	Mes	Amortización de los recursos y equipos	
Total mes :			4,000

Presupuesto parcial nº 1. Definición del proyecto y formación teórico-práctica

Nº	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
U.O.1	H	Definición del proyecto			
			Total h :	10,000	108,15
					1.081,50
U.O.2	H	Formación teórico-práctica			
			Total h :	70,000	29,61
					2.072,70
Total Presupuesto parcial nº 1. Definición del proyecto y formación teórico-pr...					3.154,20

Presupuesto parcial nº 2. Desarrollo de la metodología

Nº	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
U.O.3	H	Realización de los ensayos			
		Total h :	12,000	97,34	1.168,08
U.O.4	H	Procesado de los datos experimentales			
		Total h :	50,000	29,61	1.480,50
U.O.5	H	Validación del modelo			
		Total h :	30,000	43,26	1.297,80
U.O.6	H	Análisis de los resultados y calibración del modelo			
		Total h :	100,000	43,78	4.378,00
Total Presupuesto parcial nº 2. Desarrollo de la metodología :					8.324,38

Presupuesto parcial nº 3. Redacción del trabajo de final de grado

Nº	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
U.O.7	H	Redacción del TFG			
			Total h :	75,000	34,76
					2.607,00
Total Presupuesto parcial nº 3. Redacción del trabajo de final de grado :					2.607,00

Presupuesto parcial nº 4. Amortización de los recursos y equipos

Nº	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
U.O.8	Mes	Amortización de los recursos y equipos			
			Total mes :	4,000	3.524,15
Total Presupuesto parcial nº 4. Amortización de los recursos y equipos :					14.096,60

Capítulo	Importe (€)
1. Definición del proyecto y formación teórico-práctica	3.154,20
2. Desarrollo de la metodología	8.324,38
3. Redacción del trabajo de final de grado	2.607,00
4. Amortización de los recursos y equipos	14.096,60
Presupuesto de ejecución material (PEM)	28.182,18
10% de gastos generales	2.818,22
6% de beneficio industrial	1.690,93
Presupuesto de ejecución por contrata (PEC = PEM + GG + BI)	32.691,33
21% IVA	6.865,18
Presupuesto de ejecución por contrata con IVA (PEC = PEM + GG + BI + IVA)	39.556,51

Asciende el presupuesto de ejecución por contrata con IVA a la expresada cantidad de TREINTA Y NUEVE MIL QUINIENTOS CINCUENTA Y SEIS EUROS CON CINCUENTA Y UN CÉNTIMOS.