



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
Escuela Técnica Superior del Diseño

CARACTERIZACIÓN DE LA OXIDACIÓN DE HOLLÍN EN UN MOTOR DE ENCENDIDO POR COMPRESIÓN

Autor: MARIA BAVIERA FRECHINA

Tutor: ANTONIO GARCÍA MARTÍNEZ

Trabajo fin de grado en ingeniería aeroespacial



Curso académico: 2015-16

Resumen

Las emisiones de hollín de un motor de encendido por compresión son el resultado de un complejo equilibrio entre la formación y la oxidación del hollín dentro del cilindro. El hollín se forma en la llama de difusión, justo después del *lift-off*. El tamaño y la masa de las partículas de hollín aumentan a medida que avanza la llama de difusión, para finalmente oxidarse parcialmente en el frente de llama. En consecuencia, las emisiones de hollín del motor dependen del balance entre la cantidad de hollín formado y oxidado dentro de la cámara de combustión. Existe una cantidad considerable de estudios en la literatura sobre la caracterización de la formación de hollín. Sin embargo, hay una falta de literatura en relación a la caracterización de la oxidación del hollín. Por lo tanto, el objetivo principal del presente proyecto es el de proporcionar un mayor conocimiento y comprensión de los procesos de oxidación del hollín. Para llevar a cabo este propósito, se han empleado una combinación de herramientas teóricas y experimentales. En particular, se ha cuantificado la concentración volumétrica de hollín a lo largo del recorrido óptico (KL) mediante un sensor optoelectrónico que emplea la técnica de dos colores. Los ensayos se han realizado en un motor diésel policilíndrico de inyección directa totalmente instrumentado. Se han realizado diferentes variaciones de parámetros motorísticos tales como la presión de inyección, el CA50, el Swirl, la tasa de EGR, la densidad y la temperatura en la cámara de combustión, que influyen en la oxidación del hollín. Las medidas de KL han sido empleadas para estimar las tasas de oxidación de hollín durante el proceso de expansión ensayando bajo diferentes puntos de operación del mapa motor.

“Invertir en conocimientos produce siempre los mejores beneficios.”

Benjamin Franklin

Agradecimientos

Me gustaría empezar dando las gracias al departamento de Máquinas y Motores Térmicos-CMT por permitirme realizar el presente proyecto en sus instalaciones, y por poner a mi disposición los recursos tecnológicos y humanos que me han permitido llevar a cabo el trabajo.

En segundo lugar agradecer a mi tutor, Antonio García, por brindarme la oportunidad de trabajar y aprender de él, así como agradecerle las horas dedicadas y el especial trato recibido, encargándose de que este proyecto tomara sentido.

También me gustaría reconocer el tiempo dedicado a lo largo de este año, la enseñanza de la metodología y la dedicación al trabajo de David Villalta, por ayudarme a encaminar y dar forma al proyecto, así como a perfeccionarlo.

Como no, a mis compañeros y compañeras del grado, que sin duda han sido una fuente de conocimiento desde el principio y nos hemos ayudado mutuamente, puesto que no hay mayor apoyo que pasar las adversidades juntos.

Por último quisiera dar las gracias a las personas que han hecho posible que mis decisiones fuesen hechos, confiando en mí y apoyándome para que llegase hasta donde estoy hoy, a mis padres y mi hermano. Y en especial, a mi pareja Jorge, que ha vivido de primera mano la dedicación y esfuerzo que conlleva el proyecto.

Documentos contenidos en el proyecto

- DOCUMENTO I: Memoria
- DOCUMENTO II: Pliego de condiciones
- DOCUMENTO III: Presupuesto

Índice General

DOCUMENTO I: MEMORIA

Tabla de símbolos	xv
1. Introducción	1
1.1 Contexto científico-tecnológico de los motores de encendido por compresión.....	1
1.2 Justificación del proyecto.....	4
1.3 Línea argumental	4
2. Caracterización de las emisiones de hollín en los MEC	7
2.1 Introducción	7
2.2 Fenomenología del proceso de combustión diésel DI.....	7
2.2.1. Fases del proceso	7
2.2.2. Estructura de la llama de difusión.....	9
2.2.3. Evolución espacial del proceso de combustión diésel	11
2.3 Emisiones de hollín	12
2.4 Conclusiones de la revisión bibliográfica	14
2.5 Objetivo trabajo.....	15
3. Fuentes de información	17
3.1 Introducción	17
3.2 Herramientas experimentales	17
3.2.1. Motor policilíndrico	17
3.2.2. Sala de ensayos	19
3.3 Técnica óptica. Método de dos colores.....	23
3.3.1. Fundamento.....	23
3.3.2. Sonda optoelectrónica. AVL VisioFem	25
3.3.3. Metodología y montaje óptico	26
3.3.4. Transparencia de llama: incertidumbre del recorrido óptico.....	27

3.3.5.	Consideraciones de ensuciamiento de ventana.....	31
3.4	Herramientas teóricas.....	34
3.4.1.	Diagnóstico de la combustión. Calmec	34
3.4.2.	Apparent combustion time, ACT.....	36
4.	Efecto de parámetros motorísticos en la oxidación del hollín.....	39
4.1	Introducción.....	39
4.2	Metodología. Condiciones de ensayo.....	39
4.3	Resultados.....	41
4.3.1.	Influencia de la variación del Swirl.....	41
4.3.2.	Influencia de la variación de CA50.....	47
4.3.3.	Influencia de la variación de EGR.....	49
4.3.4.	Influencia de la variación de densidad.....	52
4.3.5.	Influencia de la variación de temperatura de admisión.....	54
4.3.6.	Influencia de la variación de presión de inyección.....	56
4.4	Relación del ACT^{-1} con el proceso de oxidación de hollín. Extensión a diferentes puntos de operación.	58
4.4.1.	Variación de SN, CA50 y EGR	58
4.4.2.	Variación de P_{iny} , φ_{PMS} y T_{adm}	63
5.	Conclusiones.....	67
5.1	Conclusiones.....	67
5.2	Estudios futuros.....	68
6.	Bibliografía.....	71

DOCUMENTO II: PLIEGO DE CONDICIONES

1.	Introducción.....	77
1.1	Definición y alcance del pliego.....	77
1.2	Condiciones legales.....	77
2.	Condiciones generales.....	77
2.1	Condiciones generales de seguridad y salud del puesto de trabajo.....	77
2.1.1.	Medidas de emergencia. Vías y salidas de evacuación.....	78
2.1.2.	Instalación eléctrica.....	78
2.1.3.	Condiciones termohigrométricas.....	79

2.1.4.	Iluminación	79
2.1.5.	Ergonomía	80
2.1.6.	Ruido	81
3.	Condiciones particulares.....	82
3.1	Condiciones de realización de los ensayos	82
3.2	Condiciones de la sala de ensayo.....	83
3.2.1.	Dimensiones y accesibilidad.....	83
3.2.2.	Ventilación y sistema de extracción de gases.....	84
3.2.3.	Condiciones de hermeticidad de la sala	85
3.2.4.	Aislamiento térmico, acústico y vibraciones	85
3.2.5.	Iluminación	85
3.2.6.	Protección eléctrica.....	86
3.2.7.	Almacenamiento y suministro de combustible.....	86
3.2.8.	Otros requisitos.....	86
3.2.9.	Condiciones de la instalación del motor.....	86
3.3	Tarado del instrumental	87
3.3.1.	Tarado del tacómetro	87
3.3.2.	Tarado del codificador angular	87
3.3.3.	Tarado de los sensores piezorresistivos	88
3.3.4.	Tarado de los transductores de presión media.....	88
3.3.5.	Tarado de balanza gravimétrica	88
3.3.6.	Tarado del medidor volumétrico de aire.....	89
4.	Normativa a cumplir por los operadores.....	89
4.1	Normas para los operadores	89
4.2	Recomendaciones S.A.E.....	90
5.	Condiciones técnicas del equipo de trabajo.....	91

DOCUMENTO III: PRESUPUESTO

1.	Presupuesto de ingeniería.....	95
1.1	Descripción del método presupuestado.....	95
1.1.1.	Mano de obra.....	95
1.1.2.	Utilización de bienes de equipo.....	95

1.1.3.	Materiales	96
1.2	Justificación de los precios	97
1.2.1.	Mano de obra.....	97
1.3	Cuadro de precios descompuestos	98
1.4	Presupuesto total	101

DOCUMENTO I
MEMORIA

Tabla de símbolos

ACT	Tiempo aparente de combustión (<i>Apparent Combustion Time</i>)
BMEP	Presión media efectiva
CAD	Ángulo de giro del cigüeñal (<i>Crank Angle Degree</i>)
CA50	Ángulo de cigüeñal donde se ha quemado el 50% de la fracción de masa
CO ₂	Dióxido de Carbono
DI	Inyección Directa (<i>Direct Injetion</i>)
dPMS	Después del Punto Muerto Superior
EGR	Recirculación de gases de escape (<i>Exhaust Gas Recirculation</i>)
EOC	Final de la combustión (<i>End of Combustion</i>)
EOI	Final de inyección (<i>End of Injection</i>)
EOMI	Final de la inyección principal (<i>End of Main Injection</i>)
FSN	Unidad para la medida de humos (<i>Filter Smoke Number</i>)
h	Entalpía específica referida a kilogramos
HC	Hidrocarburos
H ₂ O	Agua
HRL	Ley de liberación de calor (<i>Heat Release Law</i>)
$I_{bb,\lambda}$	Intensidad espectral del cuerpo negro
I_{soot}	Intensidad espectral del hollín
KL	Espesor óptico, Factor de concentración volumétrica de hollín acumulada a lo largo de un determinado espesor
m	Masa
MCIA	Motor de Combustión Interna Alternativo
MEC	Motor de Encendido por Compresión
MEP	Motor de Encendido Provocado
NO _x	Óxidos de nitrógeno
O ₂	Oxígeno
[O ₂]	Fracción molar de oxígeno
OH	Hidróxido
P_{iny}	Presión de inyección
PM	Partículas (<i>particulate matter</i>)
PMS	Punto Muerto Superior
POC	Punto de combustión (<i>Point of combustion</i>)
POI	Punto de inyección (<i>Point of injection</i>)
Q	Tasa de calor
R	Constante de la ecuación de estado
R ²	Coefficiente de determinación
RoHR	Tasa de liberación de calor (<i>Rate of Heat Release</i>)
SN	Swirl (<i>Swirl Number</i>)
SoI	Inicio de inyección (<i>Start of Injection</i>)
$t_{1/2}$	Tiempo de vida media
T_{adm}	Temperatura del aire admitido

u	Energía interna específica
u_0	Velocidad de inyección
VGT	Turbina de geometría variable
α	Coefficiente de capacidad de absorción
ε	Emisividad
λ	Longitud de onda
ρ_a	Densidad del aire
φ_{PMS}	Densidad en la cámara de combustión
Φ_0	Dosado equivalente

1. Introducción

Para iniciar el presente proyecto, esta sección tiene como objetivo principal presentar el contexto tecnológico desde la aparición de los motores diésel de inyección directa (DI) y su posterior desarrollo desde la década de los 90 hasta la actualidad, así como las previsiones futuras de investigación que conllevan a la justificación del proyecto.

Por otro lado se va a mostrar la línea argumental que sigue el documento, para así proporcionar al lector una mayor comprensión de las diferentes secciones que éste comprende y a su vez dar una visión de conjunto del trabajo realizado.

1.1 Contexto científico-tecnológico de los motores de encendido por compresión

Se puede afirmar que el nacimiento de los motores modernos que se conocen hoy en día viene marcado por la creación del primer motor de combustión interna alternativo de cuatro tiempos, desarrollado por Nikolaus August Otto en 1867. Éste estaba basado en los ciclos termodinámicos desarrollados a partir de la revolucionaria máquina de vapor del siglo XVIII, y fue conocido como motor de Gasolina o de encendido provocado (MEP). Ya desde entonces, la sociedad se ha beneficiado de esta tecnología tanto en el ámbito industrial como en el de la movilidad de personas y mercancías.

Con el objetivo de proporcionar un estado de bienestar en la sociedad, el desarrollo de los motores de combustión interna alternativos se ha enfocado desde sus inicios en la obtención de elevadas prestaciones y altas eficiencias energéticas. Es por ello que en 1898 el ingeniero francés Rudolf Diesel busca desarrollar un MCI que se aproxime en la medida de lo posible al motor térmico de máxima eficiencia propuesto por Carnot, patentando así un nuevo concepto de motor de combustión interna alternativo conocido como motor diésel o motor de encendido por compresión (MEC), cuyo rendimiento superaba a los ya existentes motores de encendido provocado (MEP). Éste se considera como uno de los hitos más importantes en la historia de los motores.

Sin embargo, durante muchos años este motor estuvo destinado a aplicaciones industriales debido a que presentaba múltiples problemas que dificultaban su posible extensión a otros campos de la tecnología, como el transporte. A pesar de su temprana aparición, no fue hasta los años 30 cuando algunos camiones y autobuses empezaron a incorporar este tipo de motor, además de crearse el primer turismo con motor diésel, que no llegó a ser producido en serie. Aún no había madurado lo suficiente la tecnología que envuelve al motor de encendido por compresión.

Problemas como el peso, el tamaño, ruidos, vibraciones y la lenta respuesta que presentaban estos motores, venían asociados a los sistemas de control de inyección

del combustible, por el momento muy aparatosos, que impedían que el motor diésel desbancara al motor gasolina en el sector del automóvil de turismo.

Junto al desarrollo de los tipos de materiales utilizados, más ligeros y resistentes, la mejora del diseño de los componentes, la sobrealimentación y el control electrónico, aparece un claro avance en la inyección de combustible, que marcará el futuro de los MEC.

En 1995 se patenta el primer sistema “Common Rail” para camiones y tan solo dos años más tarde, Alfa Romeo saca al mercado el primer turismo que incorporar esta tecnología. Se conoce como inyección directa, y proporciona un mayor control sobre la inyección de combustible en la cámara de combustión de los motores diésel, proporcionando, por un lado velocidades de combustión mayores, lo que se traduce en poder aumentar el régimen de giro y permitiendo aumentar así la potencia que proporcionan estos motores.

En Europa este hecho se ha reflejado en las crecientes cifras de venta de los vehículos equipados con este motor. En concreto se observa en la Figura 1.1 la evolución de matriculaciones de vehículos diésel y gasolina en España [1].

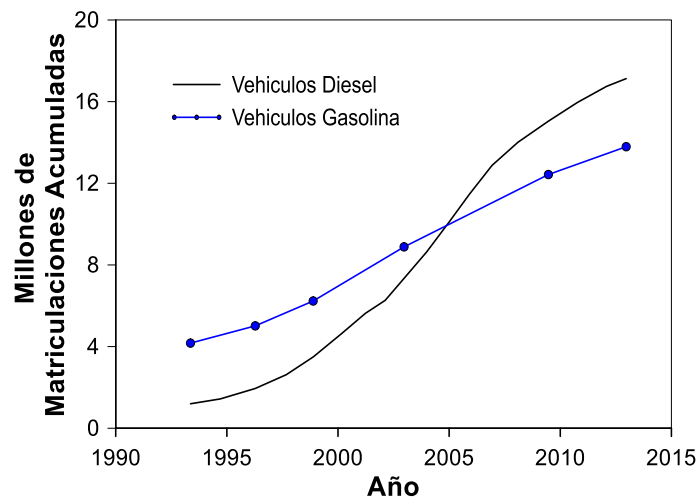


Figura 1.1. Millones de matriculaciones en España.

Este apreciable auge ha sido el resultado de una respuesta adecuada ante dos retos principales: la presión del mercado, que obliga a los fabricantes a producir motores con menores consumos específicos, mayores prestaciones y fiabilidad, y la legislación anticontaminante, cada vez más restrictiva.

Puesto que, al mismo tiempo que el motor diésel va salvando las dificultades tecnológicas, brota en la década de los 50 una fuerte preocupación por los contaminantes generados por los MCIAs debido a que en Los Ángeles se experimentaron grandes cantidades de *smog* (unión de las palabras *smoke* y *fog*), anglicismo que denomina la niebla causada por el humo de los motores, y que resulta perjudicial para la salud humana provocando irritaciones en las vías respiratorias, entre otros inconvenientes. Surgen en consecuencia, las primeras normativas en cuanto a emisión de contaminantes de los MCIAs [2]. Estas limitaciones han añadido un campo

extra al conjunto de parámetros a tener en cuenta durante el diseño y desarrollo de un motor.

Las vigentes normativas sobre contaminación en Europa de obligado cumplimiento para la homologación y venta de turismos y vehículos comerciales ligeros se denominan normativas EURO, e imponen niveles distintos para las principales emisiones contaminantes según se trate de motores de encendido provocado (MEP) o motores de encendido por compresión (MEC).

En la Tabla 1.1 se observa la evolución de las normativas EURO sobre distintas emisiones reguladas para MEC, y se puede apreciar como los límites permitidos se han ido reduciendo a lo largo de los años.

Tipo	Fecha	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM
Euro I	07/1992	2.72	-	0.97	-	0.14
Euro II	01/1996	1.0	-	0.9	-	0.10
Euro III	01/2000	0.64	-	0.56	0.50	0.05
Euro IV	01/2005	0.50	-	0.30	0.25	0.025
Euro V	09/2009	0.50	-	0.23	0.18	0.005
Euro VI	09/2014	0.50	-	0.17	0.08	0.005

Tabla 1.1. Normativa europea sobre las emisiones para turismos diésel, en g/km.

El cumplimiento de esta normativa, con tendencia cada vez más restrictiva, ha obligado a los fabricantes a invertir una gran cantidad de recursos en investigación y desarrollo de nuevas soluciones para cumplir con estos requisitos.

Los esfuerzos de los investigadores centran sus esfuerzos en la búsqueda de métodos de reducción de emisiones contaminantes mediante su tratamiento una vez han sido generadas, lo que se conoce como soluciones pasivas, o bien centrar la investigación en la búsqueda de soluciones activas, es decir, las que implican actuar sobre el propio foco de generación de la emisión contaminante.

El primer método tiene como inconveniente la necesidad de añadir más equipos auxiliares al motor, lo que dificulta su arquitectura y aumenta el coste de producción. Un ejemplo de este tipo de soluciones son los sistemas de post-tratamiento instalados en la línea de escape, algunos de los cuales incluyen elementos como el platino cuyo coste es muy elevado.

El segundo método implica investigar en el foco de la generación de emisiones contaminantes a partir de modificaciones en los sistemas de gestión del aire o de inyección. Éste uno de los propósitos de los modelos predictivos y de diagnóstico de la combustión así como de los estudios paramétricos, marco en el que se encuentra el estudio teórico-experimental del presente proyecto.

1.2 Justificación del proyecto

Se pueden deducir, por lo tanto, dos aspectos relevantes que definen la justificación del proyecto.

La ventajosa posición adquirida por el motor diésel frente a los de gasolina, que como ya se ha comentado anteriormente, es debida de la mejora del proceso de combustión y la aparición de diferentes avances tecnológicos. Éstos le han permitido ceñirse a la cada vez más restrictiva legislación de contaminantes y al mismo tiempo cumplir con creces las demandas del mercado. Vehículos equipados con este tipo de motor presentan mayores prestaciones y un menor consumo.

Por otro lado, las normativas en cuanto a contaminantes son más restrictivas con el paso del tiempo y está previsto que en el futuro se mantenga esta tendencia. En consecuencia, surge la preocupación de los fabricantes de este tipo de motores acerca de continuar investigando, tanto en los sistemas de post-tratamiento como en los diagnósticos de combustión, con el fin de reducir las emisiones contaminantes. En concreto atacar a las emisiones de hollín y NOx.

De este modo, durante los últimos años numerosos investigadores se han centrado en el desarrollo y estudio de nuevos modos de combustión en los MEC, con el fin de esclarecer y comprender más profundamente los complejos procesos termofluidodinámicos implicados en la inyección-combustión. Esto ha permitido a los fabricantes reducir las emisiones contaminantes a la vez que las prestaciones obtenidas no se ven alteradas.

En este contexto se enmarca el presente proyecto y la justificación de su desarrollo, dado el requerimiento de continuar avanzando en la investigación en este campo de la ciencia.

A su vez, el presente proyecto viene justificado por la culminación del grado en Ingeniería Aeroespacial y la consecuente obtención del título.

1.3 Línea argumental

En la presente sección, se va a describir el hilo conductor general que se ha seguido a lo largo del presente proyecto para proporcionar al lector una idea conjunta del proyecto y una mayor comprensión de su objetivo.

Por un lado, este proyecto se enmarca dentro del ámbito de la investigación de los motores de combustión interna alternativos, siendo éste posible gracias al Departamento de Máquinas y Motores Térmicos (CMT Motores Térmicos) de la Universidad Politécnica de Valencia. Más concretamente pertenece al departamento de Combustión.

Tras la justificación general del estudio de los métodos activos como parte de la solución al problema de cumplir la normativa anticontaminantes y obtención a su vez de mayores prestaciones que cumplan las demandas del mercado, en la Sección 2 se realiza una descripción de los principales fenómenos fisicoquímicos involucrados en el proceso de combustión por difusión diésel. Se detalla la estructura temporal y espacial de una llama de difusión diésel, para a continuación profundizar en las

emisiones de hollín, que comprenden el complejo balance entre los procesos de formación y oxidación del hollín. Esto nos lleva a esclarecer los objetivos del presente trabajo, referentes al proceso de oxidación del hollín.

Para llevarlos a cabo, y atendiendo a la complejidad de estos objetivos, la metodología propuesta implica el uso de fuentes de información experimental y teóricas. En la Sección 3 se realiza una descripción detallada de los equipos de medida y metodologías experimentales así como de las diferentes herramientas teóricas para el diagnóstico de la combustión. Resaltando dentro de las herramientas experimentales la sonda optoelectrónica VisioFem, empleada para la realización de las medidas de radiación de hollín dentro del motor utilizado a lo largo de este trabajo, y el motor de producción de GM diésel 1.9L de cilindrada; en cuanto a la metodología experimental destacar el método de dos colores y como herramienta de diagnóstico de la combustión, CALMEC.

En la Sección 4 se analizan y se presentan los resultados obtenidos tras ensayar en el motor policilíndrico en cuestión. En primer lugar se presenta la metodología de ensayo, que consiste en la variación de ciertos parámetros motorísticos (Swirl, tasa de EGR, CA50, presión de inyección, temperatura de admisión y densidad dentro de la cámara de combustión) con el objetivo de hallar la influencia de cada uno de ellos sobre la tasa de oxidación de hollín. Se explica también la metodología teórica seguida para la obtención de los parámetros que se emplean como trazadores tanto de la concentración de hollín como de la mezcla. Un segundo análisis se lleva a cabo presentando conjuntamente las variaciones de los distintos parámetros para unas mismas condiciones de velocidad y carga del motor. De esta manera se pretende proporcionar una visión global del estudio y analizar el proceso de oxidación del hollín obteniendo una relación entre ambos parámetros.

Una vez presentados los resultados, en la Sección 5 se sintetizan las conclusiones más relevantes extraídas tras realizar el estudio, junto a las indicaciones que se podrían seguir para continuar con él en un futuro.

A modo de resumen, en la Figura 1.2 se muestra el esquema completo de la línea argumental que se va a seguir en el presente trabajo.

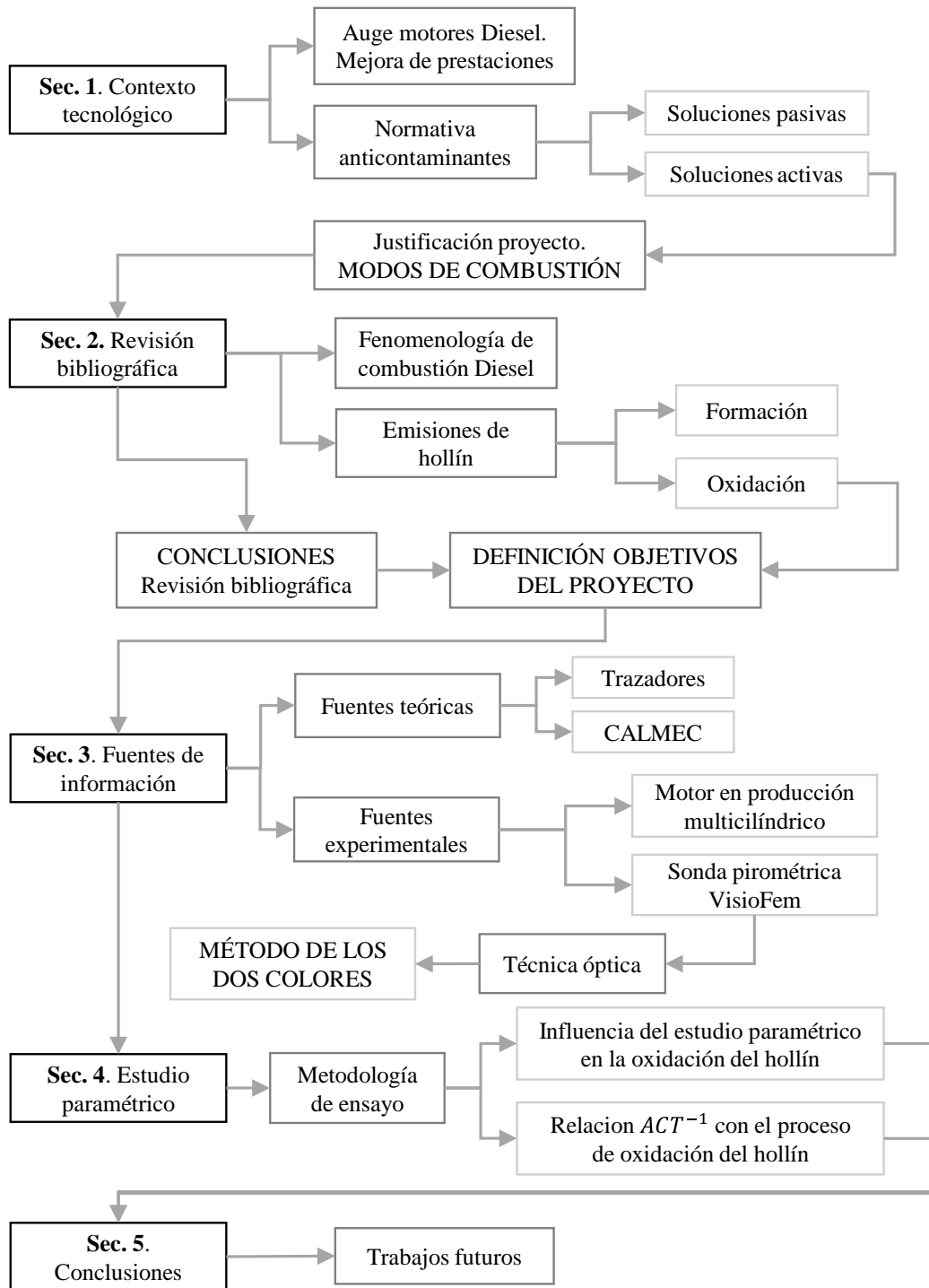


Figura 1.2. Diagrama de flujo de la línea argumental del presente proyecto.

2. Caracterización de las emisiones de hollín en los MEC

2.1 Introducción

En esta sección se va a realizar una descripción conceptual y concreta de los principales fenómenos físico-químicos involucrados en los procesos de combustión y emisiones de hollín en un motor de encendido por compresión de inyección directa.

De forma precisa se puede decir que la finalidad de la presente sección es explicar al lector los conceptos necesarios para que comprenda los objetivos y el planteamiento general del estudio que se ha llevado a cabo.

2.2 Fenomenología del proceso de combustión diésel DI

En esta sección se va a realizar una descripción del estado del conocimiento acerca de los procesos físicos que principalmente tienen lugar dentro de la cámara de combustión de un motor diésel de inyección directa. En definitiva, se pretende conocer cómo se produce el proceso de combustión en un chorro diésel para así entender en concreto el fenómeno que nos interesa, el balance entre formación y oxidación de hollín, y como consecuencia, las emisiones de hollín.

2.2.1. Fases del proceso

Para dar una explicación cualitativa de la evolución del proceso de combustión diésel, se representa en la Figura 2.1 de manera conjunta la evolución temporal de la masa de combustible inyectada por unidad de tiempo (tasa de inyección) y el calor liberado por unidad de tiempo, calculado a partir de la medida de presión en el cilindro (tasa de liberación de calor). Se pueden distinguir, por lo tanto, cuatro fases principales en el proceso de combustión diésel de inyección directa [3], [4]:

- La primera se trata de la *fase de retraso al autoencendido* y comienza tras el inicio del proceso de inyección, cuando aparentemente no hay liberación de calor importante. Es en este espacio de tiempo cuando el chorro se mezcla con el aire gracias a los procesos de atomización, englobamiento de aire y evaporación, en una atmósfera con presencia de oxígeno, dando lugar a prereacciones químicas de baja intensidad que producen la rotura de las moléculas de combustible en cadenas de hidrocarburos más cortas, así como la formación de radicales libres. Esta secuencia de procesos culmina en el autoencendido espontáneo de la mezcla que marca el final de esta fase. El autoencendido se puede apreciar en la Figura 2.1 debido a un crecimiento súbito de la ley de liberación de calor.

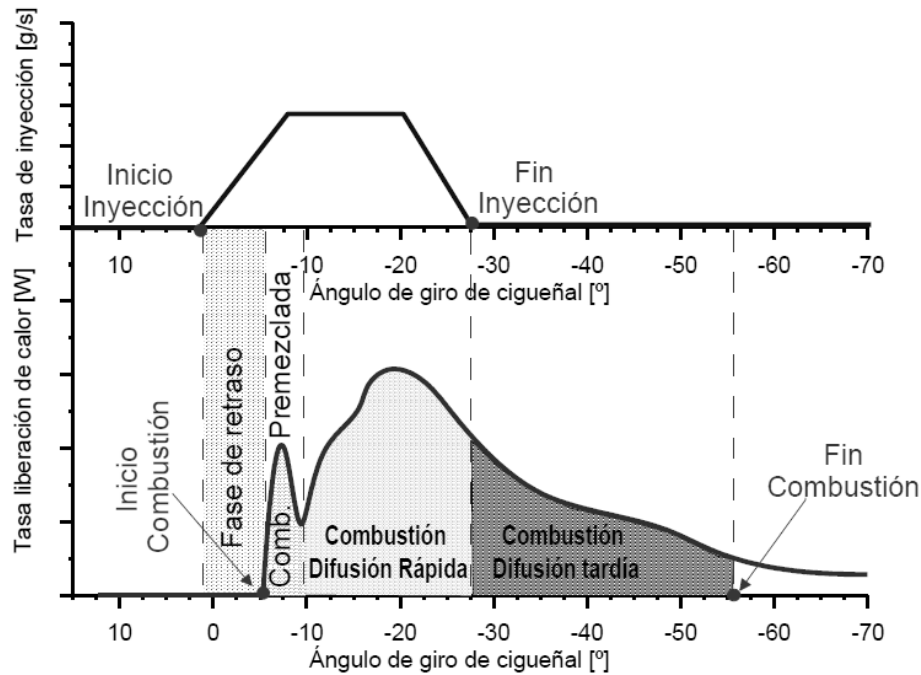


Figura 2.1. Fases de la combustión a partir de la comparación temporal entre las tasas de inyección de combustible (curva superior) y la de la liberación de calor (curva inferior). Imagen adaptada de García [4].

- La segunda se denomina como *fase de combustión premezclada*. En una combustión convencional, se suele definir la duración de esta fase desde el inicio de la combustión hasta el primer mínimo relativo de la curva de liberación de calor. En ella se oxida el combustible que se ha mezclado con el aire entre los límites de inflamabilidad durante la *fase de retraso al autoencendido* pero que todavía no ha podido reaccionar. Por tanto, los procesos físico-químicos que controlan esta fase están íntimamente ligados con los que han tenido lugar durante el proceso de autoencendido. Asimismo, debido a la alta disponibilidad de combustible mezclado, la tasa característica de liberación de calor es elevada.
- La tercera fase se trata de la *combustión por difusión*. La ley de liberación de calor durante la combustión por difusión viene controlada principalmente por el proceso de mezcla del combustible evaporado con el aire en el interior de la cámara. Mientras dura la inyección, el proceso de mezcla está controlado por la cantidad de movimiento que introduce el chorro en la cámara. La estructura de la llama alcanza un periodo de cuasi-estacionariedad, que se mantiene mientras se está inyectando. Por tanto, se define la duración de esta fase desde el final de la fase de combustión premezclada hasta el final del proceso de inyección.
- Cabe mencionar también una última etapa, que sería la *fase de combustión por difusión tardía*. En el instante en que el proceso de inyección llega al final, termina el periodo cuasi-estacionario de la combustión por difusión al que sigue la fase de combustión por difusión tardía. En esta

fase, se observa una caída de la tasa de liberación de calor al empeorar el proceso de mezcla causado por el deterioro del proceso de mezcla aire/combustible debido a la desaparición del aporte de cantidad de movimiento por parte de la inyección. Se tiene pues un periodo transitorio en donde la llama adquiere estructuras aleatorias y la tasa de liberación de calor viene regida por la disipación de la energía cinética turbulenta, de tal forma que la combustión va perdiendo intensidad hasta que ésta termina.

2.2.2. Estructura de la llama de difusión

El conocimiento de la estructura de la llama de difusión diésel ha sido objeto de estudio por parte de multitud de autores. Dicho estudio ha ido vinculado al desarrollo de nuevas herramientas experimentales y computacionales, sobre todo en lo que se refiere a técnicas de visualización óptica. El modelo conceptual que se ha asumido en el presente trabajo y que ha sido ampliamente aceptado por la comunidad científica es el desarrollado por Dec [5] y Flyn [6].

Cabe reseñar que dicho modelo conceptual es válido desde el inicio de la fase de combustión por difusión hasta el final del proceso de inyección, es decir, es válido durante el cuasi-estacionario en que la llama se autosustenta por el aporte convectivo del combustible (a través de la cantidad de movimiento generada por el proceso de inyección) y difusivo del aire.

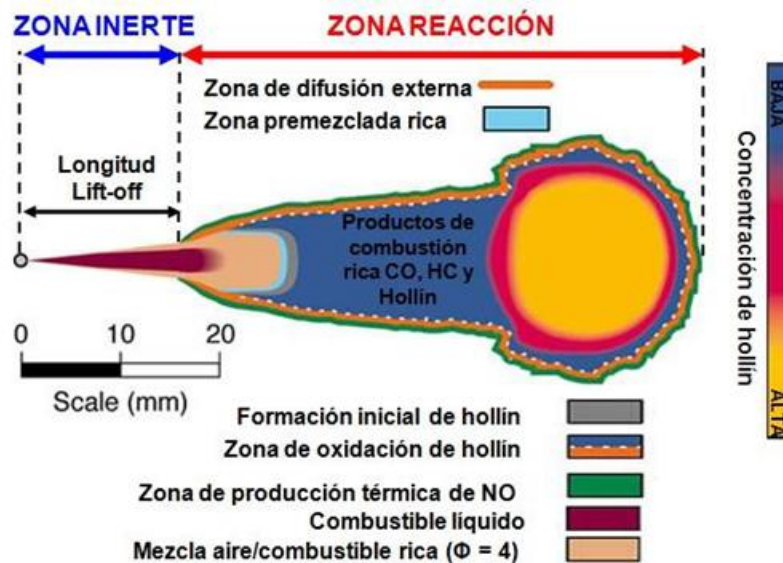


Figura 2.2. Esquema de la estructura de la llama diésel durante la fase cuasiestacionaria de la fase de combustión por difusión. Adaptado del trabajo de Dec [5].

La Figura 2.2 muestra un esquema del modelo conceptual obtenido mediante la técnica óptica de “laser-sheet imaging” durante la parte cuasiestacionaria de la combustión por difusión.

De forma cualitativa se pueden distinguir las siguientes zonas en el esquema [4]:

- Zona I, *Lift-off*: delimitada entre la tobera de inyección y la longitud al *lift-off* (distancia de despegue de llama o “*flame lift-off length*”). En esta zona no se tiene reacción química. Cerca del inyector se tiene una parte de combustible en estado líquido. Los procesos relevantes son los de atomización, englobamiento y evaporación, con lo que en esta zona el chorro reactivo es igual que el inerte en condiciones evaporativas.
- Zona II, *Combustión premezclada rica*: espacialmente situada aguas abajo de la Zona I. Dec hace la hipótesis de que en la mencionada Zona II se consume todo el oxígeno englobado por el chorro en la Zona I. Como consecuencia, en el interior de la Zona III (zona de combustión por difusión) la concentración de oxígeno es nula. De acuerdo con Dec [5], los productos de esta reacción de dosado rico sirven como base para la formación de hollín.
- Zona III, *Combustión por difusión*: A partir de la zona I y rodeando a la Zona II, la llama adquiere una estructura de llama de difusión compuesta a su vez de dos zonas: una zona interna, en donde según Dec se tiene productos parciales creados en la Zona II, combustible sin quemar y hollín, y una zona externa que rodea a la interna y hace las veces de zona de reacción.

Si bien la formación de hollín viene determinada en la Zona II, su crecimiento se da durante la Zona III. En el esquema de la Figura 2.2 se pueden apreciar diferentes concentraciones de hollín en el interior de la llama, creciendo su concentración a medida que se avanza aguas abajo de la Zona II hasta que alcanza la parte frontal de la llama, en donde se observa un vórtice característico que presenta la concentración de partículas de hollín más elevada. Adicionalmente, cuando el hollín alcanza la zona de reacción se oxida de manera completa, principalmente por el ataque de los radicales OH formados en la propia llama de difusión. El oxígeno presente en el gas que rodea a la llama también contribuye al citado proceso de oxidación.

Por otra parte, los óxidos de nitrógeno se forman en la zona más externa de la mencionada zona de reacción ya que las condiciones son ideales para la formación del NO, al menos por vía térmica. La combustión se produce en condiciones cercanas al estequiométrico, las temperaturas son elevadas y adicionalmente se dispone de oxígeno en el gas que rodea a la zona de reacción. De forma complementaria cabe resaltar que la formación de NO continúa después de finalizar la inyección durante la fase de combustión por difusión tardía.

Con este modelo conceptual se puede ver, en primera aproximación, que las zonas donde el hollín es oxidado gracias a unas condiciones locales determinadas son, por el contrario, las condiciones ideales para la formación de NO. A su vez, esto nos

proporciona una información muy valiosa a la hora de focalizar el análisis del proceso de oxidación de hollín, relevante para que finalmente las emisiones de hollín sean mínimas.

2.2.3. Evolución espacial del proceso de combustión diésel

Se completa la descripción cualitativa del proceso de combustión por difusión a través del modelo conceptual de Dec con la descripción de los fenómenos físico-químicos que sufre el combustible en su evolución espacial a través de cada una de las zonas anteriormente descritas y que conforman la llama, se muestran en la Figura 2.3.

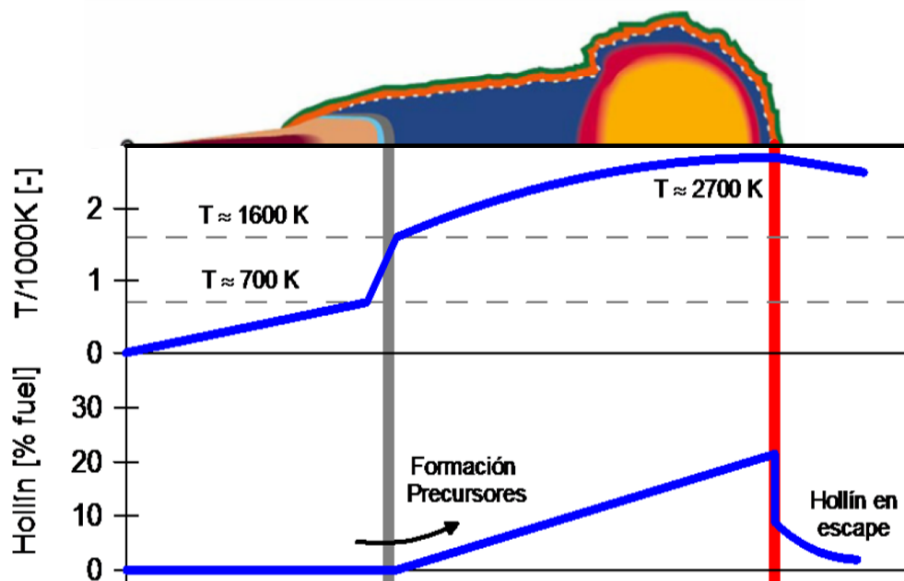


Figura 2.3. Evolución espacio-temporal de un paquete de masa inyectado durante la parte cuasi-estacionaria de la fase de combustión por difusión. Adaptado de Antonio García [4].

El combustible, tras salir de la tobera de inyección, se atomiza y se mezcla con el aire. El englobamiento de aire caliente hace que las gotas creadas durante el proceso de atomización se calienten, de tal forma que el combustible líquido se evapora hasta una distancia característica en donde ya no queda combustible líquido, que se denomina longitud líquida. Al finalizar el proceso de evaporación la relación másica entre aire/combustible (dosado relativo) es rica del orden de 2 a 4, y el combustible ha pasado de la temperatura de inyección a un valor en torno a 700 K.

Conforme el combustible atraviesa esta zona de mezcla rica reacciona químicamente en un proceso débilmente exotérmico, elevando su temperatura hasta 1600K y dando lugar a una serie de productos parciales, principalmente monóxido de carbono e hidrocarburos de cadena corta no saturados. Estos hidrocarburos se consideran como los precursores para la formación de hollín.

Tras la zona de premezcla rica, el combustible entra en la zona interna de la llama de difusión, como se ha mencionado en la sección anterior. En esta zona hay

ausencia de oxígeno debido a que la zona de reacción externa y la zona de premezcla contigua impiden la entrada del mismo. Por tanto, el combustible en esta zona interior de la llama de difusión continúa mezclándose y englobando gases aunque no libera energía alguna. El camino del combustible a través de la zona interior hacia la zona de reacción de la llama de difusión, es decir, el frente de llama, viene condicionado por una elevada temperatura del mencionado frente que junto con los precursores generados en la premezcla rica originan la aparición de hollín en el interior de la llama. Así pues, el hollín se genera en pequeñas partículas y va creciendo en el interior de la llama al aproximarse al frente de llama, junto al cual alcanza su tamaño máximo.

Cuando el combustible atraviesa el frente, los productos parciales de la combustión son oxidados por el oxígeno del exterior del frente de llama, aportado por difusión, liberando el resto de energía que poseía el combustible (80-85%) y que no había sido liberada durante la combustión premezclada rica. Con esta oxidación total, se alcanzan las temperaturas más elevadas durante todo el proceso, del orden de la adiabática de llama. A estas temperaturas, el hollín formado previamente es oxidado y sus niveles decrecen prácticamente a cero. Por el contrario, la tasa de formación de óxidos de nitrógeno crece súbitamente.

Finalmente, tras atravesar el frente de llama los productos de la combustión se diluyen con el resto de gases presentes en la cámara.

2.3 Emisiones de hollín

En la presente sección se pretende situar al lector en los avances concretos que los investigadores han logrado acerca del proceso de oxidación del hollín y, por lo tanto, el punto de partida del presente trabajo.

En primer lugar, para los motores diésel, las principales emisiones contaminantes son los NO_x y las partículas de hollín, que también deben adherirse estrictamente a las regulaciones de emisiones futuras con tendencias cada vez más restrictivas. En este aspecto, es realmente un desafío reducir conjuntamente las emisiones de NO_x y de hollín y al mismo tiempo mantener la eficiencia de este tipo de motor.

Numerosos investigadores, [7] y [8] han estudiado el efecto de la radiación del hollín en el mecanismo de transferencia de calor global y la eficiencia del motor.

La concentración de hollín presente en las emisiones de un motor diésel es el resultado del balance entre dos procesos estrechamente relacionados y a su vez totalmente antagónicos: la formación y la oxidación de hollín. Se ha concluido de las subsecciones anteriores que la formación de hollín tiene lugar en la región más próxima a la tobera de inyección, dependiendo por lo tanto del dosado equivalente local en la longitud de despegue de llama (longitud de *lift-off*) [4], [9]. Sin embargo, la oxidación del hollín está altamente relacionada con la temperatura y la tasa de mezcla, fenómeno que ocurre en la llama de difusión. Es conocido que ambos procesos varían tanto espacial como temporalmente.

La evolución temporal de la concentración de hollín en el cilindro puede dividirse en dos fases. Una primera, que se inicia en el SoI (inicio de inyección) y termina con el final de la inyección (EoI); y se caracteriza por que la cantidad de hollín formado es mayor que la cantidad de hollín que se oxida. Seguida de una segunda etapa, donde la formación de hollín toma un segundo plano siendo el mecanismo dominante el proceso de oxidación del hollín, ésta tiene lugar desde el EoI hasta el final del proceso de combustión, EoC. Por lo tanto es destacable que solo una parte del hollín formado en el cilindro será posteriormente expulsado en los gases de escape [10].

En la literatura existen múltiples estudios que investigan y se focalizan en el proceso de formación de hollín [11] [12]. Sin embargo el proceso de oxidación de hollín no se ha estudiado ampliamente y, por lo tanto, el conocimiento acerca de éste es limitado.

En relación al proceso de oxidación de hollín, se pueden destacar varios estudios. En primer lugar, Dembinkski [13] analizó el comportamiento de este proceso mediante la realización de una variación de Swirl (manteniendo una presión de inyección elevada) con el objetivo de aumentar la creación de turbulencia dentro de la cámara de combustión. Concluyó que el proceso de oxidación del hollín mejora gracias a un aumento de turbulencia dentro del cilindro.

También Pickett [14] estudió la influencia de la densidad ambiente en el punto muerto superior (PMS) en el proceso de oxidación de hollín. Una disminución de este parámetro causaba una importante disminución del valor máximo alcanzado de fracción volumétrica de hollín, lo que se traduce en una combustión de mayor duración y un desarrollo más lento.

Otros investigadores, han realizado un estudio del parámetro de EGR (recirculación de gases de escape) para evaluar la influencia sobre la oxidación del hollín. En particular, Gallo [15] demostró que se produce una reducción de éste proceso dentro del cilindro cuando la concentración de oxígeno disminuye, empleando para su estudio un motor óptico diésel. Además, su investigación también se centró en obtener una correlación experimental entre la oxidación de hollín y las emisiones de escape. Para estimar las tasas de oxidación durante la expansión, emplearon medidas de *Laser Extinction Measurements* (LEM) en función del tiempo.

Por último, Huestis [16] realizó un estudio tanto de los procesos que tienen lugar dentro del cilindro, como de las emisiones producidas en los gases de escape. Combinó la pirometría de dos colores y la medida de concentración de hollín en la línea de escape. Las medidas que se recogían de la luminosidad propia de la llama se realizaron en la sección transversal del cilindro, empleando fotodiodos con diferentes filtros. Observó que disminuyendo la admisión de oxígeno desde un 21% hasta un 9%, la tasa de oxidación hollín en la *fase de combustión por difusión tardía*, decrecía de manera monótona. Además las emisiones de hollín en los gases de escape seguían las mismas tendencias que la masa de hollín medida en el cilindro.

2.4 Conclusiones de la revisión bibliográfica

Tras el conocimiento por una parte de la evolución temporal de la llama diésel, y por otro lado de la estructura y evolución espacial que presenta éste tipo de llama, una primera conclusión relevante es que el inicio de la formación de hollín viene determinado por la Zona II, donde los productos de la reacción de dosado rico sirven como precursores de su formación, y se desarrolla en la Zona III, la zona interna de la llama donde se alcanza un vórtice con la concentración de partículas de hollín más elevada; todo el proceso tiene lugar durante la *fase de combustión por difusión*, cuando la temperatura es suficientemente elevada para ello.

La segunda conclusión se trata de la localización del proceso la oxidación del hollín, y será información relevante para la realización del estudio del presente proyecto. Éste tiene lugar durante la *fase de combustión por difusión tardía*, que se da una vez termina el proceso de inyección y cuando la tasa de liberación de calor cae debido al empeoramiento del proceso de mezcla aire/combustible; a su vez se produce en la parte externa de la Zona III, que se trata de la zona de reacción de la llama, principalmente por el ataque de los radicales OH formados en la propia llama de difusión y por la presencia de oxígeno rodeando la llama. Por lo tanto, este proceso va a estar influenciado por la temperatura y la capacidad de mezcla.

Por otra parte, atendiendo a la investigación de Huestis [16], ha quedado demostrado que a pesar de ciertos inconvenientes, la pirometría de dos colores puede usarse para estudiar el proceso de oxidación del hollín. En su investigación fue empleado el método de dos colores, que por lo tanto será método escogido en el presente estudio, y viene ampliamente explicado en la Sección 3.3.

Se puede afirmar también que se ejerce una gran influencia en la tasa de oxidación del hollín mediante la variación de ciertos parámetros motorísticos, lo que es ventajoso en la búsqueda de reducir las emisiones de hollín.

Finalmente, se puede concluir que los conocimientos acerca del proceso de oxidación del hollín son limitados, y es interesante ampliar el conocimiento en esta rama de la ciencia.

2.5 Objetivo trabajo

Tras el análisis del marco de investigación actual acerca de la oxidación del hollín, el objetivo principal de este proyecto, por lo tanto, va a ser el estudio de la oxidación del hollín ensayando en diferentes puntos de operación, que abarcan parte del mapa motor, y a su vez variando diferentes parámetros motorísticos, para así proporcionar mayor conocimiento y claridad sobre este fenómeno. De esta manera, el estudio se va a centrar en estudiar el proceso de oxidación en función de diferentes parámetros. En consecuencia, los ensayos se han realizado variando el Swirl, la tasa de EGR, los tiempos de inyección, la presión de inyección, la temperatura de admisión y la densidad ambiente dentro de la cámara de combustión.

Para alcanzar el anterior objetivo, ha sido necesario definir parámetros que proporcionen información acerca del proceso de oxidación de hollín o la tasa de oxidación, así como de la evolución de la mezcla dentro del cilindro de un motor diésel. Para ello se ha calculado el KL, empleado como trazador de la fracción volumétrica de hollín dentro del cilindro, y el ACT^{-1} , basado en la liberación de calor experimental y parámetros de inyección, que se trata de un indicador de la mezcla. Para explicar el proceso de oxidación del hollín se ha hallado una relación entre ambos parámetros.

Finalmente, se pretende dar una visión global del estudio analizando la influencia de cada parámetro ensayado y comparando conjuntamente diferentes variaciones de éstos parámetros para un mismo punto de funcionamiento.

3. Fuentes de información

3.1 Introducción

En este apartado, se trata de introducir todas las herramientas que han sido empleadas para obtener toda la información necesaria y así poder afrontar con éxito los objetivos planteados en la Sección 2.5.

La complejidad de los mencionados objetivos implica la utilización de un conjunto de fuentes de información experimentales y teóricas.

En este aspecto, por una parte se han realizado los ensayos en un motor policilíndrico diésel en una sala de ensayos ubicada en el CMT, mediante el uso de técnicas ópticas, empleando el sistema de medida denominado VisioFem. El fundamento de este sistema de medida es el método de dos colores. Por otra parte, los resultados deseados se han obtenido mediante la herramienta teórica de análisis de combustión, Calmec y finalmente empleando ciertas magnitudes que permiten analizar tanto la capacidad de mezcla (ACT^{-1}) como la concentración de hollín que existe dentro del cilindro (KL).

3.2 Herramientas experimentales

3.2.1. Motor policilíndrico

Para este estudio se empleó un motor diésel de producción de General Motors R8D (EEUU) con 1.9L de cilindrada. El motor de cuatro cilindros utiliza un sistema de inyección de combustible *Common-Rail*, incorpora un turbogrupo de geometría variable (VGT), un sistema de recirculación de gases de escape (EGR) y una válvula de admisión de EGR. El motor presenta cuatro válvulas por cilindro y inyector localizados de manera centrada. El Swirl puede variarse desde 1.4 hasta 3 utilizando los alabes que incorpora para controlarlo. Cabe destacar que este motor se atiene a la normativa de emisiones EURO IV.

A modo de resumen, en la Tabla 3.1 se incorporan los datos relevantes del motor.

Tipo de motor	DI con 4 cilindros y 4 tiempos
Volumen desplazado	1900 cc.
Carrera	90.4 mm
Diámetro	82 mm
Ratio de compresión	17.5:1
Potencia máx. [kW]	110 @4000rpm
Par máx. [Nm/ min^{-1}]	320 / 2000-2750
Sistema de inyección	Bosch CommonRail (solenoide)
Presión máx. en rail [bar]	1600
Diámetro de tobera [mm]	0.141

Agujeros de inyección	7
Tasa de flujo hidráulico [cm^3 (30s) @100bar]	440

Tabla 3.1. Características del motor policilíndrico diésel.

3.2.1.1. Sistema de adquisición de datos

SAMARUC [17] es el software que realiza el control y la adquisición de datos de las variables medias mediante un proceso totalmente automatizado. Una particularidad de este sistema es que permite la comunicación entre el usuario y la instalación mediante un PC que incorpora el software indicado. Este software permite visualizar por pantalla el estado general de la instalación y modificar los parámetros regulados por los sistemas auxiliares.



Figura 3.1. Captura de pantalla Samaruc.

DRIVVEN [18] se trata del otro sistema de adquisición de datos empleado, en este caso, para la adquisición de presión instantánea dentro del cilindro. Este es uno de los parámetros motorísticos que permite adquirir, analizar y grabar; también es capaz de adquirir las presiones de admisión y escape, la presión del rail y la señal de tensión correspondiente a la inyección. También es empleado para controlar los ajustes del motor, permitiendo que se modifiquen los parámetros deseados, como la posición de la válvula de EGR, la posición de la VGT, cantidad de combustible inyectado y tiempo de inyección, y la válvula de Swirl. El sistema es capaz de controlar en tiempo real diferentes variables de combustión como la fase de combustión.

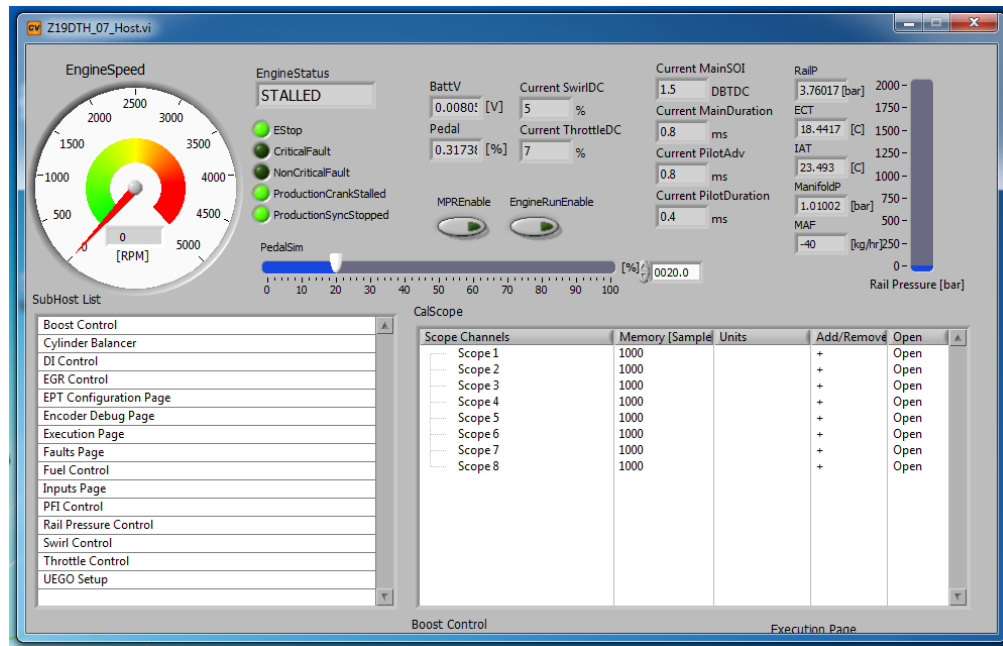


Figura 3.2. Captura de pantalla DRIVEN.

3.2.2. Sala de ensayos

En esta sección se pasa a describir los diferentes componentes y sistemas que conforman el núcleo de la instalación experimental empleada para el desarrollo del presente proyecto.

En primer lugar, las salas de ensayos, donde están ubicados los motores e instrumentación adecuados. Se encuentran situadas en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos (CMT), dentro de la zona de laboratorios para ensayos de motores. A su vez, este departamento se encuentra en el Edificio de Investigación 6D de la Universidad Politécnica de Valencia. En concreto, el motor y la instrumentación necesaria empleados en este proyecto están ubicados en la sala 8.

3.2.2.1. Características de la sala de ensayos

La sala empleada en el presente proyecto cumple con una serie de condiciones que fueron planteadas en el momento de su diseño y para una finalidad determinada. Las características de la sala son:

- Estructura de la sala concebida para no transmitir las vibraciones al resto del edificio.
- Paredes de fácil limpieza y anti reflejante de la luz.
- Dimensiones suficientes para el montaje de todos los elementos y acoplamiento de futuros equipos no previstos en el diseño inicial.
- Espacio permitido suficiente para que una persona pueda trabajar cómodamente. De esta forma se pueden llevar a cabo las labores de mantenimiento y reparación en el interior de la sala, así como cambiar el motor de forma simple y sencilla para adaptarse a nuevos proyectos.

- Insonorización acústica para minimizar la emisión de ruido al exterior.
- Sistemas de seguridad, suficientes y capaces de controlar riesgos de contaminación de la atmósfera de trabajo, riesgos de seguridad de los operarios y riesgos de incendio que puedan ocurrir en su interior, como parte del peligro adyacente a este tipo de actividades.
- Está equipada con motor asíncrono capaz de ensayar puntos de ensayo tanto estacionarios como transitorios y dispositivos RLS que permiten ensayar ciclos dinámicos de vehículos.
- Transductores de presión instantánea en los cilindros y en colectores de escape y admisión.
- Sistemas de adquisición de datos de alta velocidad desarrollados por el CMT.
- Sistemas para la medición de emisión de partículas y gases de escape.

3.2.2.2. *Bancada*

Las funciones de la bancada son diversas. Tiene la misión de soportar el conjunto motor-freno, reducir el nivel de vibraciones y esfuerzos que transmite al suelo y por extensión al resto de la sala y también la función, muy importante, de facilitar el montaje correcto y una alineación buena entre el freno y el motor de una manera fácil.

Las características generales de la bancada de la sala son las siguientes:

- Bancada formada por 4 perfiles HEB 180 y 2 UPN 180 en los extremos, soldados a una placa de acero de espesor 20 mm, con unas dimensiones generales de 3 m. de longitud y de 1 m. de ancho.
- Perfiles colocados longitudinalmente separadas entre sí por 25 mm, para poder anclar allí tanto la estructura que soporta el motor como el freno y a su vez permite el desplazamiento longitudinal de los mismos.
- Bancada anclada sobre 16 muelles helicoidales al cimiento de la misma. Los muelles son los elementos capaces de absorber las vibraciones del sistema. Estos muelles son de 5 espiras de 10 mm de grosor y 30 mm de radio curvatura.

3.2.2.3. *Sistema de ventilación y de control*

Las funciones principales del sistema de ventilación de la sala son, por un lado, eliminar posibles humos del escape o gases procedentes del combustible, y refrigerar la atmósfera de la sala.

El sistema se encuentra gobernado por un sistema de control que controla todas las salas, de manera que desde el ordenador se puede acceder al sistema y regular la ventilación.

3.2.2.4. *Equipos asociados al sistema de adquisición de datos*

Los principales equipos que se encargan de proporcionar la adquisición de datos son:

- Sensores de par y régimen

Para este proyecto, el motor se encuentra acoplado a un dinamómetro eléctrico que se encarga de controlar el régimen y la carga de éste.

- Sensores de temperatura medias

Se precisan de determinados sistemas auxiliares a los que es necesario proporcionarles la medida de diferentes temperaturas medias.

Por lo tanto, para la adquisición de temperaturas en líquidos como en el refrigerante de aceite y el refrigerante de agua en los intercambiadores, se emplean termómetros termoresistivos (PT100) con un rango de medida de -30 hasta 350°C. Para la temperatura de gases como los de admisión, escape y líneas de EGR, se emplean termopares del tipo K, con un rango de -200 hasta -1250°C.

Estas variables medias se adquirieron con una frecuencia de muestreo baja, de 100 Hz, empleando el sistema de ensayos desarrollado por el CMT, SAMARUC, que recoge las señales de los diferentes sensores y controla a su vez el dinamómetro eléctrico.

- Transductor de presión instantánea

Para la medida de la presión instantánea de los gases en el interior de la cámara de combustión se utiliza un transductor piezoeléctrico de presión refrigerado de la marca comercial Kistler modelo 6125C10. Este tipo de sensor se emplea especialmente para esta aplicación motorística debido a su baja sensibilidad a los choques térmicos. Además de la utilización del amplificador de señal Kistler 4603B10. Éste presenta un rango de medida de entre 0 y 300 bar.

Para la adquisición de datos de la presión dentro del cilindro se empleó un intervalo de ángulo de cigüeñal de 0.5°, que se llevó a cabo utilizando el software que controla el motor, DRIVVEN, descrito anteriormente.

3.2.2.5. *Medidores de caudal másico*

Es necesario medir tanto el caudal másico de aire y de combustible como el caudal de líquido refrigerante.

El flujo másico de aire se mide mediante el sistema AVL Flowsonix Air, con un rango de medida desde 0 hasta 1400 kg/h.

El gasto másico de combustible se mide mediante una balanza gravimétrica modelo AVL 733s.18. La medida se realiza a través de un sensor capacitivo que genera una señal eléctrica en función de la cantidad de masa de combustible instantánea contenida en el depósito. El rango de uso del equipo va de 0 a 41,67 g/s con una precisión en la medida de $\pm 0.2\%$ sobre el valor medido. De manera adicional y complementaria se realiza también la medida de gasto másico de combustible a

través del ratio aire/combustible proporcionado por el analizador de gases de escape calculado por el equipo de medida de gases de escape basado en la composición de los gases de escape y el caudalímetro de aire.

En cuanto al caudal de líquido refrigerante se emplea el sistema DN25 Flow meter, con un rango de medida desde 8.8 hasta 350 l/min.

3.2.2.6. *Equipo de medida de composición de gases de escape*

Para la medida de la composición de los gases de escape se utiliza un analizador modelo HORIBA MEXA 7100 DEGR. Con este equipo se puede medir la concentración volumétrica de diferentes emisiones gaseosas consideradas como contaminantes tales como el NO y/o NO₂ (NO_x), el CO, los hidrocarburos sin quemar totales (THC) así como el CO₂ y el O₂ en el escape. Los NO_x, CO, CO₂ y O₂ medidos se corrigen para considerar la humedad existente en los gases de escape según la Directiva Europea 88/77/CEE puesto que la muestra que se ha analizado ha sido secada previamente. Por el contrario, la medida de THC no se corrige puesto que la muestra no se seca previamente.

El equipo se conecta a la línea de escape mediante una sonda por la que se extrae una muestra de gases que posteriormente se conducen hasta el equipo de medida por una línea calefactada a 192°C, para evitar así la condensación de los hidrocarburos sin quemar. La sonda se ubica aguas abajo de la válvula de contrapresión de escape debido a que el equipo de medida no puede funcionar correctamente si la muestra de gases está a una presión superior a 1.2 bar absolutos. De manera complementaria, el equipo dispone de una segunda sonda instrumentada en el colector de admisión que permite medir la concentración volumétrica de CO₂ en el citado sistema. De tal forma que comparando la medida de CO₂ en la admisión y en el escape el equipo proporciona un valor de la tasa de EGR.

A pesar de que los principios de funcionamiento del citado equipo no son objeto de estudio del presente proyecto, sí se considera importante nombrarlos de manera resumida en la Tabla 3.2.

Emisión gaseosa	Principio de funcionamiento	Precisión
CO y CO ₂	Analizador no dispersivo en el infrarrojo	±4%
NO y NO ₂	Analizador de quimioluminiscencia	±4%
THC	Analizador de ionización de llama	±4%
O ₂ en escape	Analizador paramagnético	±4%

Tabla 3.2. Principio de funcionamiento para la medida de las diferentes emisiones gaseosas del equipo Horiba Mexa 7100DEGR.

3.2.2.7. Opacímetro

Para la medida de la emisión de humos en los gases de escape se emplea un opacímetro modelo AVL 415.

El principio de funcionamiento del mencionado opacímetro consiste en hacer pasar una muestra de gases de escape por un filtro de papel blanco del que se conoce su índice de reflexión de la luz para posteriormente, mediante una célula fotoeléctrica, detectar el grado de ennegrecimiento del citado papel al hacer pasar el gas de escape. Por lo tanto se puede decir, que la medida se fundamenta en la comparación del índice de reflexión de la luz. El fondo de escala del equipo está comprendido entre un valor mínimo 0 FSN, papel completamente en blanco, y un valor máximo de 10 FSN, papel completamente ennegrecido. Siendo FSN, Filter Smoke Number, la unidad asignada a la mencionada escala.

Por otro lado, la citada muestra para realizar la medida se extrae del sistema de escape prácticamente a presión atmosférica, el volumen de dicha muestra lo regula directamente el equipo en función del modo de empleo que se le seleccione (tiempo constante).

3.3 Técnica óptica. Método de dos colores

3.3.1. Fundamento

Mediante esta técnica óptica se pretenden obtener valores sustanciales de la radiación emitida por la llama de difusión que tiene lugar en la combustión de un motor diésel DI.

El hollín va a caracterizar la radiación emitida por la llama, puesto que es esta sustancia la que mayor emisión de radiación presenta en los rangos de temperatura de llama que se alcanzan en un motor diésel (700 -2800K), mucho mayor que la que emiten otras sustancias presentes como H_2O , OH , CO_2 ..., que emiten por el fenómeno de quimioluminiscencia.

Este hecho es clave también, por ejemplo, en técnicas de visualización convencional, que emplean cámaras en el rango de longitud de onda visible. Las imágenes de la llama tomadas son visibles gracias a la visualización de la radiación de hollín presente en la llama.

La incandescencia del hollín tiene lugar desde el final de la combustión premezclada hasta prácticamente el final del proceso de combustión.

Las partículas de hollín que se encuentran en el interior de la llama, presentan una temperatura muy elevada, similar a la del gas que lo rodea y como cualquier otro cuerpo éstas emiten radiación térmica.

La base de partida de esta técnica es suponer que la radiación emitida por una llama de hollín recibida por un observador puntual depende de la longitud de onda, de la temperatura y de la cantidad de hollín presente en la misma.

Se puede expresar de la siguiente manera:

$$I_{soot}(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, \text{cantidad de hollín}) \cdot I_{cn}(\lambda, T) \quad (1)$$

que representa que la radiancia espectral del hollín I_{soot} es proporcional a la radiancia I_{bb} que emitiría un cuerpo negro a la misma temperatura y longitud de onda, ponderada mediante la emisividad ε que depende de la longitud de onda y de la cantidad de hollín.

La radiancia que emitiría un cuerpo negro es conocida y viene dada por la ley de Plank indica que, para el cuerpo negro:

$$I_{bb}(\lambda, T) = \frac{1}{\lambda^5} \left[\frac{c_1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \right] \quad (2)$$

Donde c_1 y c_2 son constantes de valor $c_1 = 1.1910439 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2/\text{sr}$ y $c_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2} \text{ m K}$.

Para entender la dependencia entre emisividad y cantidad de hollín se ha de tener en cuenta de dónde procede esta radiación. En un cuerpo sólido, la energía térmica es radiada desde la superficie del mismo y existe una ubicación clara del punto de partida de la misma. La llama puede considerarse como una distribución espacial continua de partículas de pequeño tamaño cuyo límite se encuentra en la superficie estequiométrica. De acuerdo a este tratamiento, la radiación que es emitida por la superficie externa procede no únicamente del hollín situado en dicha superficie, sino también por la radiación emitida por el hollín que se encuentra en el interior de la llama, y que tiende a salir por su superficie tras una serie de procesos de absorción y dispersión. Se puede considerar, por lo tanto, un cierto grado de *transparencia* en la llama, que depende de la cantidad de hollín presente en el recorrido óptico y que determina en qué proporción la radiación esta infundida por las partículas del interior de la llama.

De esta manera, la llama a nuestros efectos va a ser un volumen semitransparente, en el que no se conoce de manera exacta de donde proviene la radiación emitida.

Por lo que a esto respecta, existen dos límites interesantes que es necesario tener en consideración. Por un lado la de llama *ópticamente espesa*, que se da cuando la concentración del hollín es muy elevada, de manera que la llama se asemeja a una superficie sólida, y la radiación del hollín procede principalmente de las partículas que se encuentran en la superficie de la llama. El límite opuesto es la llama *ópticamente transparente*, que se da cuando la concentración de hollín es lo suficientemente baja para que la radiación procedente del extremo opuesto de la de la llama la atraviese por completo y contribuya a la radiación que recogería un receptor situado en la parte opuesta. En este caso el camino óptico recorrido por la radiación incluye todo el espesor de la llama. Ambos límites se pueden dar simultáneamente en una llama dependiendo del punto de vista del receptor.

De acuerdo a las leyes de óptica de partículas pequeñas, si la temperatura y la distribución de hollín (fracción volumétrica) a lo largo del camino óptico son uniformes y el mecanismo de propagación de la radiación de absorción domina frente

al de dispersión, se puede cuantificar la emisividad de la llama mediante la expresión:

$$\varepsilon_{\lambda, K_{ext}, L} = 1 - \exp(-K_{ext} \lambda \cdot L) \quad (3)$$

donde L es la longitud del recorrido óptico de la radiación y K_{ext} es el parámetro de extinción del hollín que depende explícitamente de la longitud de onda λ , de la fracción volumétrica del hollín V_{soot} y de las propiedades ópticas del mismo.

En el ámbito del método de dos colores es más usual emplear una expresión empírica para el coeficiente de extinción, $K_{ext} \lambda = k_{soot}/\lambda^\alpha$, obtenida por Hottel y Broughton [19], donde k_{soot} sería proporcional a la fracción volumétrica de hollín a lo largo del recorrido óptico V_{soot} , y α es una constante empírica. De esta manera la emisividad resulta con la siguiente expresión:

$$\varepsilon_{\lambda, K_{ext}, L} = 1 - \exp\left(-\frac{k_{soot} \cdot L}{\lambda^\alpha}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{KL}{\lambda^\alpha}\right) \quad (4)$$

Debido a las incertidumbres antes mencionadas respecto a la procedencia de la radiación, se suele emplear como variable para definir la cantidad de hollín el producto $KL = k_{soot} \cdot L$, que sería proporcional a la fracción volumétrica de hollín V_{soot} y al camino óptico recorrido por la radiación.

El valor de α depende de parámetros como la longitud de onda, el tamaño de las partículas de hollín o el índice de refracción del mismo. Zhao y Ladommatos [20] recopilan los valores de este parámetro propuestos por diversos autores, recomendando el empleo de un valor de 1.39, que es válido para la mayoría de combustibles si se emplea longitudes de onda del espectro visible, como es el caso. Además en este rango espectral la solución es poco sensible al valor de α escogido.

Finalmente, la radiación procedente del hollín quedaría cuantificada por la expresión:

$$I_{soot}(\lambda, T, KL) = \left[1 - \exp\left(-\frac{KL}{\lambda^\alpha}\right)\right] \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{c_1}{\left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1\right]} \quad (5)$$

que presenta la dependencia de tres parámetros: longitud de onda, temperatura y cantidad de hollín. El método de dos colores permite obtener los dos parámetros de interés (temperatura y cantidad de hollín) a partir de dos medidas de radiación a diferentes longitudes de onda.

Su fundamento es sencillo y la instrumentación no es altamente complicada, por lo que ha sido empleado para el estudio de la llama diésel en este proyecto.

3.3.2. Sonda optoelectrónica. AVL VisioFem

El equipo de medida empleado para la adquisición de medidas de radiación en este proyecto ha sido el sistema optoelectrónico de fotodiodos y filtros ópticos de banda conocida como VisioFem, desarrollada por AVL. Se trata de un sistema de medida puntual, que ha sido empleado en la cadena de medida para evaluar la

radiación de forma directa sobre la llama basándose en la técnica óptica conocida como el método de dos colores.

Se trata de una sonda en la que en su extremo se sitúa una lente de zafiro, que es capaz de capturar la luz emitida por la llama de combustión del motor con un ángulo de visión de 90° . Mediante una carcasa protectora, la cadena de medida, formada por este sensor óptico de zafiro y un cable de fibra óptica, es introducida en la cámara de combustión de tal manera que tiene acceso directo al proceso de combustión. De este modo toma medias reales de la radiación de la llama. Esta señal luminosa es dividida en dos canales separando la información en una señal correspondiente a 600 nm y otra a 950 nm con las que se procede a la recomposición de forma analógica de la intensidad radiada por la llama y que posibilitan, mediante la aplicación del método de dos colores, la evaluación real de la formación de hollín y la temperatura.

Las señales son grabadas junto a la codificación angular, lo que permite conocer la concentración de hollín en el interior de la cámara en función del ángulo del cigüeñal.



Figura 3.3. Sonda AVL VisioFem

3.3.3. Metodología y montaje óptico

La metodología empleada para el sistema de adquisición de datos en este proyecto ha sido mediante un sistema de medida puntual, que en este caso se trata de una sonda optoelectrónica conocida como VisioFEM, desarrollada por AVL.

El acceso óptico que se precisa es reducido, ya que se trata de un motor de producción, y la respuesta dinámica del sistema es elevada, permitiendo recoger datos de radiación de ciclos completos. Sin embargo la señal grabada es una integración de la radiación, con lo que no existe resolución espacial, se trata por lo tanto de una limitación del método de dos colores. Esta característica es requerida en caso de que la finalidad del estudio fuese obtener la distribución espacial de la radiación en una llama diésel o conocer su estructura, sin embargo no es problema para el caso que se requiere estudiar, y por lo tanto se trata de una técnica apropiada.

Las longitudes de onda elegidas pertenecen al rango del espectro visible, en concreto son $\lambda_1 = 600 \text{ nm}$ y $\lambda_2 = 950 \text{ nm}$.

Las medidas de hollín dentro del cilindro fueron llevadas a cabo con un convertidor de señal optoelectrónico, que presenta una selección de fotodiodos y filtros ópticos de banda estrecha adaptados a la llama de combustión del motor y las medidas de hollín.

A este equipo de medida óptico se le ha dedicado la anterior sección para su pertinente explicación. Por lo tanto, como ya se ha descrito con anterioridad, se trata de una lente de zafiro situada en el extremo de la sonda, que es capaz de capturar la luz emitida por la llama de combustión del motor con un ángulo de visión de 90° . La radiación del hollín se transmite a través de la fibra óptica y se divide en los dos filtros de las longitudes de onda anteriormente mencionadas. Estos dos filtros interferenciales dejan pasar únicamente la longitud de onda de interés, a pesar de que presentan un ancho de banda de 10 nm .

A continuación, los fotodiodos convierten la intensidad en una señal de voltaje. Esta señal es amplificada y almacenada cada 0.5° CAD . La conversión y el acondicionamiento de la señal aseguran la máxima linealidad posible entre la intensidad de radiación de entrada y la señal de voltaje de salida finalmente obtenida.

Las señales optoelectrónicas medidas en bruto y los valores absolutos de intensidad de luz obtenidas, están relacionados entre sí por la calibración de toda la cadena de medidas mediante un lámpara de halógeno que proporciona una un campo homogéneo de iluminación.

Por lo tanto, la señal grabada representa la información espacialmente integrada con gradientes espaciales significantes de dosado relativo y de temperatura a lo largo del recorrido óptico o como se conoce en inglés, *line of sight*. Este problema junto al ensuciamiento de la ventana de la sonda son las principales consideración a tener en cuenta al usar el método de dos colores.

Una vez obtenidos los valores de radiancia asociados a cada longitud de onda, se puede calcular la temperatura y el factor KL mediante la resolución de un sistema de ecuaciones:

$$I_{soot,n} T, KL = \left[1 - \exp\left(-\frac{KL}{\lambda_n^\alpha}\right) \right] \cdot \frac{1}{\lambda_n^5} \cdot \frac{c_1}{\left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda_n T}\right) - 1 \right]} \quad n = 1,2 \quad (6)$$

donde las incógnitas son T y KL.

La resolución de este sistema ha sido realizada mediante la aplicación del método de la secante, implementado en la herramienta matemática Matlab.

3.3.4. Transparencia de llama: incertidumbre del recorrido óptico

Para aplicar adecuadamente este método se deben tener en cuenta varios aspectos característicos de esta técnica óptica.

Un aspecto de gran relevancia en el método de dos colores es la interpretación que se pueda hacer de los resultados obtenidos. Conviene analizar qué representan los valores de temperatura y factor KL medidos por la sonda, así como las restricciones existentes en esta interpretación.

En primer lugar, cabe destacar que la hipótesis de que la radiación de la llama en un punto puede representarse a partir de las dos variables características T y KL se basa en la existencia de una distribución espacial constante de temperatura y fracción volumétrica de hollín en todo el espesor de la llama de donde procede la radiación. Este hecho no ocurre en realidad en ninguna de las dos variables. El factor de KL medido representaría la integral de la fracción volumétrica de hollín V_{soot} a lo largo del camino óptico, mientras que la temperatura sería un valor promedio espacial realizado en base a la propagación de la radiación en el interior del hollín. El método de dos colores, por tanto, supone que ninguna de las dos variables cambia espacialmente.

Debido a esta hipótesis tan fuerte, es necesario tener en cuenta que atenuación están sufriendo las medidas de radiación debido al recorrido óptico, es decir, que incertidumbre introduce en las medidas el hecho de que se trate de una medida puntual y que se considere una distribución uniforme tanto en el campo de temperaturas, como en la distribución de la concentración de hollín, KL, a lo largo del espesor de la llama. Para ello, eligiendo adecuadamente un modelo de radiación, se puede conseguir que estas incertidumbres sean leves y asumibles.

Diferentes autores han tratado con anterioridad los efectos de la temperatura del hollín y los gradientes de KL en la llama de un motor mediante el método de dos colores.

En concreto, de manera más reciente Svensson [21] propuso un nuevo modelo de la distribución de la temperatura y hollín para evaluar el impacto de la incertidumbre del recorrido óptico o el espesor de la llama en la temperatura del hollín y el KL. Para la distribución de la temperatura, utilizó la temperatura adiabática de llama en condiciones estequiométricas como representación de la parte reactiva (2717K con 1000K de temperatura ambiente). En la parte inerte de la llama, se consideró también la temperatura adiabática de llama pero en este caso en condiciones ricas (2000K). En cuanto a la distribución del KL, ésta fue considerada de valor constante y uniforme. Mediante estos modelos planteados, concluyeron que los resultados de temperatura medidos con el método de dos colores, en comparación a los obtenidos por el modelado, eran más precisos, debido a que la llama presenta una primera superficie caliente, la estequiométrica, que proporciona la mayoría de la radiación emitida. En relación al modelado de KL, se obtuvieron valores muy bajos independientemente de las condiciones de operación ensayadas, se trataban de unas diferencias con respecto a las medidas obtenidas mediante el método de dos colores de en torno al 90% y 70% usando valores medidos experimentalmente de 2.4 y 0.6 respectivamente. Tomando como base esta investigación, se va a evaluar el efecto de la propagación de radiación sobre la transparencia de llama y su influencia en la incertidumbre de la temperatura del hollín y de los gradientes de KL.

En la Figura 3.4 se puede apreciar el modelo de radiación dentro de la llama que se ha decidido plantear, además también se aprecia que se ha realizado una

división de ésta en n elementos discretos, cada uno con su correspondiente valor de temperatura y de KL.

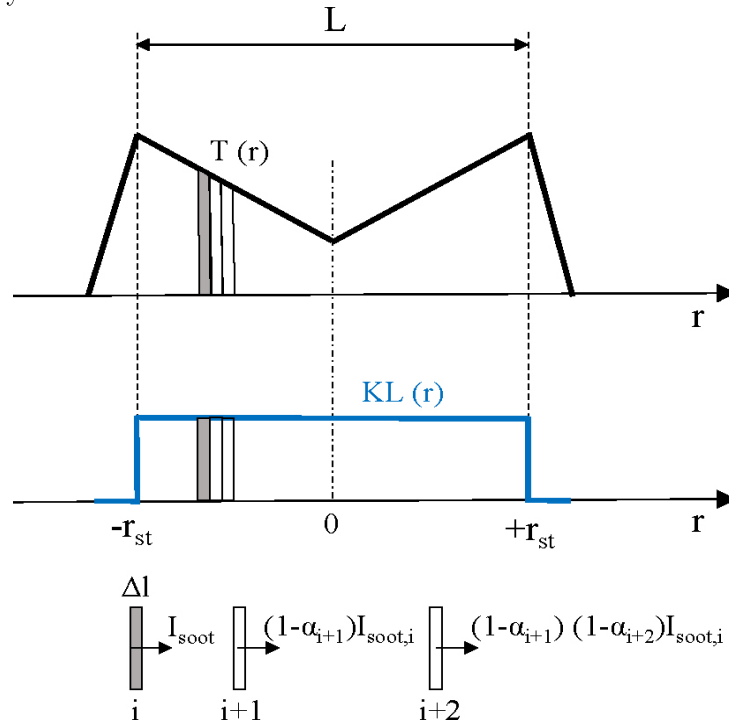


Figura 3.4. Esquema que muestra la propagación radial de la radiación emitida por los i elementos a través de la llama hasta el sensor de radiación.

Para analizar el efecto de la propagación de radiación dentro de la llama, serán considerados tanto los procesos de emisión como de absorción.

De esta manera, el sensor optoelectrónico recibirá una cantidad de radiación como resultado del proceso de propagación de la radiación basada en las siguientes hipótesis:

- La radiación se propaga a lo largo de las líneas paralelas al plano principal de simetría de la llama.
- La distribución espacial de la temperatura local del gas se asume que es la misma que la del hollín. En este caso, se propone una distribución lineal. En particular, se han seleccionado temperaturas adiabáticas de llama en condiciones estequiométricas y ricas para definir el perfil. La temperatura adiabática de llama ha sido calculada asumiendo una presión constante en cada paso del cálculo, una combustión adiabática de la mezcla estequiométrica combustible/aire y también considerando un modelo de equilibrio químico convencional.
- Se ha considerado una distribución uniforme y constante de KL.
- Se asume que el hollín se oxida completamente en la superficie estequiométrica de la llama.

Para realizar el cálculo, se ha seguido un procedimiento similar al propuesto por Payri [22]. El recorrido de la radiación se divide en n elementos con el mismo grosor. Cada elemento llamado i presenta una temperatura T_i y un espesor óptico KL_i . De esta manera, para el cálculo del hollín, teniendo en cuenta que se ha considerado distribución uniforme, se puede afirmar que:

$$KL = \sum_{i=1}^n KL_i = K \cdot \sum_{i=1}^n L_i \quad (7)$$

Por otro lado, la radiación emitida por cada elemento puede calcularse como:

$$I_{soot,i}(\lambda, T_i, KL_i) = \varepsilon_{\lambda,i} I_{bb}(\lambda, T_i) \quad (8)$$

La radiación recibida por el sensor en cada longitud de onda, es la suma de la radiación emitida por cada elemento, teniendo en cuenta su correspondiente atenuación de la siguiente manera:

$$I_{soot,\lambda} = \sum_{i=1}^n [\varepsilon_{\lambda,i} I_{bb}(\lambda, T_i) \cdot \prod_{j=i+1}^n (1 - \alpha_{\lambda,j})] \quad (9)$$

Donde para un elemento j la absorción se define por la capacidad de absorción espectral con la expresión siguiente, atendiendo a la ley de Kirchhoff:

$$\alpha_{\lambda,j} = \varepsilon_{\lambda,j} \quad (10)$$

Una vez se ha definido el modelo, se pretenden evaluar dos casos para determinar el rango de incertidumbre en término de limitación del recorrido óptico. En este sentido, se evalúan los casos con el menor y el mayor valor de KL obtenidos de manera experimental, tras realizar las medidas en el motor mediante el método de dos colores, que serán mostrados más tarde en la sección de resultados.

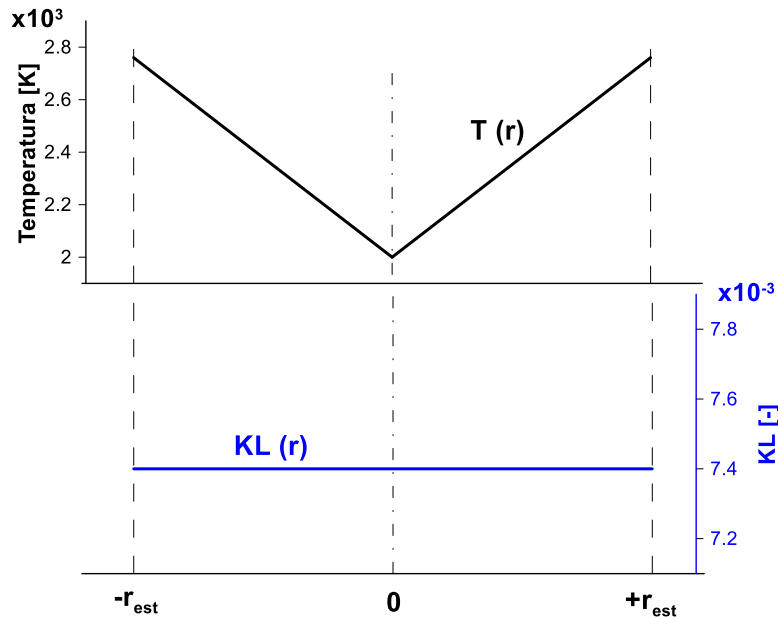


Figura 3.5. Modelo de transparencia de llama.

La Figura 3.5 muestra el modelo de transparencia de llama en el caso de menor valor de KL medido, 0.4. Se ha planteado un gradiente lineal dentro de la llama, en particular se ha analizado el impacto de un gradiente bastante drástico (760K).

Para la condición estequiométrica radial se impone una temperatura adiabática de llama de 2760K y para la línea central del chorro se considera una temperatura de 2000K, que es representativa de las condiciones ricas que pueden encontrarse en la parte inerte de la llama [21]. Las temperaturas adiabáticas de llama son obtenidas mediante las condiciones de carga no quemada medidas del motor (temperatura y presión dentro del cilindro de 1005K y 55 bar, respectivamente, y $X_{O_2}=0.21$). Para el KL, se ha propuesto una distribución uniforme de hollín considerando el mismo espesor que la discretización del chorro dentro de la llama, de manera que al ser ese perfil integrado se obtenga el valor de KL que se está analizando.

Como resultado, el modelo indica que el KL debe presentar un valor de 0.33, lo que significa una reducción del 17% si se compara con la obtenida por el método de dos colores de manera experimental (KL=0.4). Este resultado es consistente con los hallados por Musculus [23] y Payri [22], quienes también encontraron una disminución del 20% en el valor de KL si se considera la incertidumbre del recorrido óptico, comparando con los resultados del método de dos colores.

Siguiendo la misma metodología, el modelo también se ha aplicado al caso del resultado de mayor valor de KL medido en el motor, $KL = 2$. En esta ocasión, el valor obtenido aplicando el modelo de radiación anteriormente explicado es de 1.05, y en consecuencia, se ha alcanzado una reducción del 47% con respecto al valor obtenido experimentalmente empleando el método de dos colores. Este error relativo tan elevado también es hallado por Musculus [23]. Por lo tanto, los gradientes de temperatura en el recorrido óptico, en este caso de 600K, causan una reducción en el valor de KL obtenido por el método de dos colores de en torno al 50%.

De esta manera, el modelo propuesto para evaluar la transparencia de llama parece ser consistente con la literatura. En referencia a la interpretación de los resultados del método de dos colores, se puede afirmar que cuanto mayor es la cantidad de hollín, mayor va a ser la incertidumbre del método. Este hecho se deberá tener en consideración cuando se analicen los resultados.

3.3.5. Consideraciones de ensuciamiento de ventana

A continuación, se explica el método de calibración empleado para la realización de las medidas. Éste es el recomendado por la empresa que ha proporcionado la sonda, AVL, y permite prevenir errores indeseados en la transmisividad debido a depósitos de hollín en la ventana de la sonda durante la realización de los ensayos.

Consiste en una combinación de calibración “directa” e “indirecta” considerando las pérdidas de transmisión de luz. La llamada calibración “directa” está basada en determinar las condiciones de ensuciamiento del sensor mediante la lámpara de calibración, una sola vez. Esta lámpara es la base de la calibración de la sonda. A continuación se determinan las condiciones del sensor cuatro veces basándose en la

luminosidad de la combustión. De esta manera, la transmisividad se determina antes de que arranque el motor y después de cada ensayo de combustión. Con este método, el nivel de contaminación del sensor está siendo continuamente monitorizado.

En cuanto a la calibración “indirecta”, la transmisividad se determina inmediatamente después de cada parada del motor. Tras finalizar las medidas, la transmisividad se obtiene mediante la lámpara de halógeno y se toma como la base de la corrección de las medidas. Por lo tanto, la calibración “directa” es empleada para la obtención de una calibración preliminar y monitorizar el sensor, y posteriormente se emplea la calibración “indirecta”, tras la realización de las medidas, para llevar a cabo la calibración exacta.

Considerando la metodología de ensayo, en cada punto de funcionamiento, una vez que el motor está establecido, se puede afirmar que cada serie de medidas completada comprende 400 ciclos de combustión, 100 ciclos por medida.

Una vez que la transmisividad es determinada, la emisión espectral es calculada mediante la ecuación:

$$I_{soot} \left[\frac{W}{m^2 \cdot m \cdot sr} \right] = \frac{\text{Señal de voltaje}[V] \cdot \text{Sensibilidad} \left[\frac{W}{m^2 \cdot m \cdot sr \cdot V} \right]}{\text{Ganancia} \cdot \text{Transmisividad}} \quad (11)$$

Donde I_{soot} se trata de la emisión espectral, la señal de voltaje esta medida a 600 y 950 nm, las constantes de sensibilidad son proporcionadas por el fabricante de la sonda pirométrica ($5.22427 \cdot \frac{10^{23}W}{m^3 \cdot sr \cdot V}$ para el canal de 600 nm y $1.85761 \cdot \frac{10^{24}W}{m^3 \cdot sr \cdot V}$ para el canal de 950 nm) y la ganancia es seleccionada dependiendo de la intensidad de luz que evita la saturación.

Asique, considerando 400 medidas por ciclo, Figura 3.6 muestra la evolución de la media temporal de las emisiones espectrales, I_{soot} , para cada longitud de onda (arriba) así como la media de las medidas de temperatura y de KL (abajo) en el punto 1500rpm@8bar. Además, la desviación estándar ha sido añadida mostrando valores razonables.

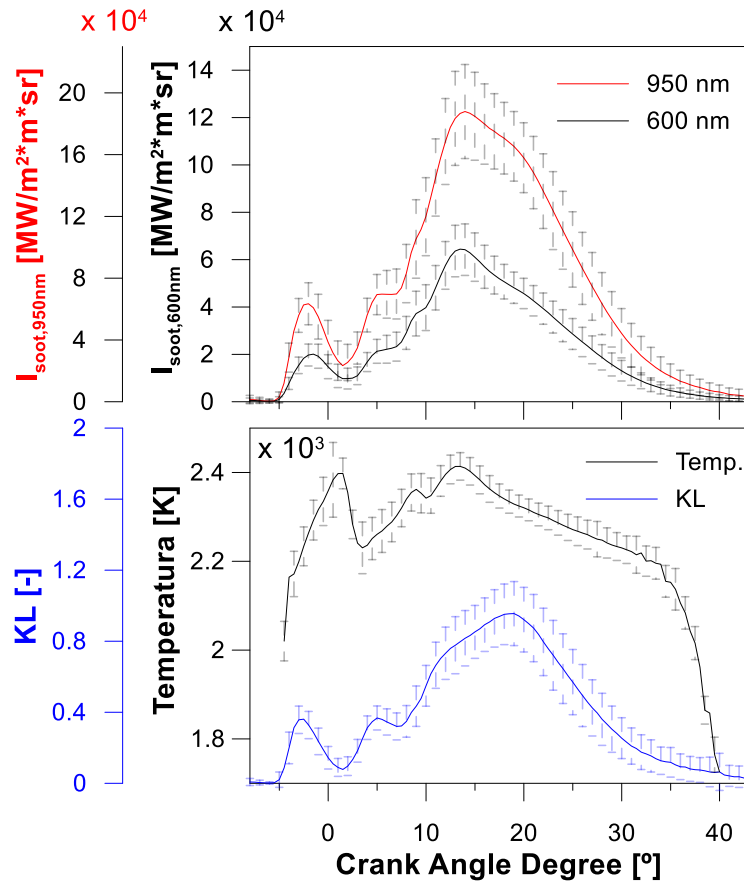


Figura 3.6. Evolución temporal de la media de la emisión espectral para cada longitud de onda (arriba) y media de las medidas de temperatura y KL (abajo) en el punto 1500rpm@8bar.

A continuación se muestra un esquema del recorrido seguido por la señal desde la llama hasta el sistema de adquisición de datos.

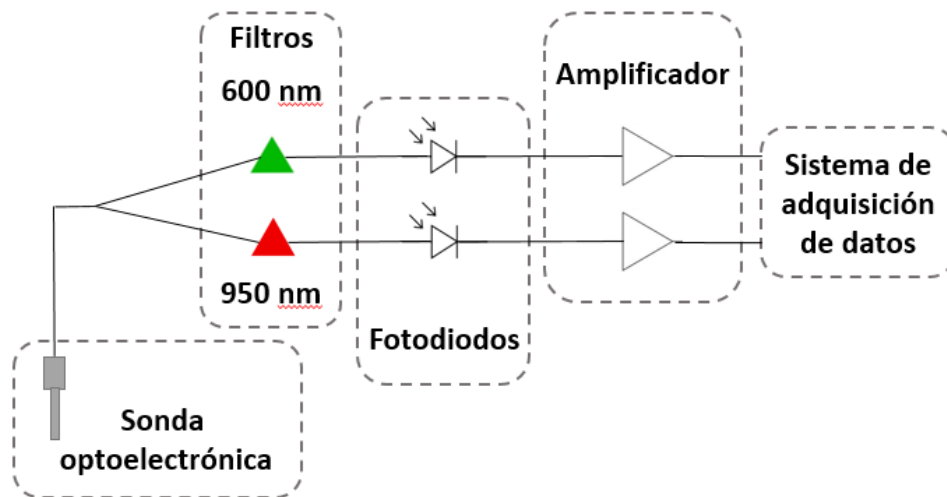


Figura 3.7. Recorrido de la señal desde la llama hasta el sistema de adquisición de datos.

Una vez se han adquirido y grabado las dos señales de tensión, se obtiene la intensidad espectral considerando la ganancia, la transmisividad y la sensibilidad. De esta manera, una vez que la señal de tensión es convertida, se aplica la ecuación

(6) para cada longitud de onda, para obtener en cada instante KL y la temperatura. Es interesante recordar que con la sonda optoelectrónica solo se obtiene resolución temporal de los resultados de la temperatura del hollín y del KL.

Con el fin de dejar aún más claro el montaje óptico, la Figura 3.8 muestra éste cuando el pirómetro optoelectrónico es utilizado en el motor. En esta figura, el pistón se sitúa en el punto muerto superior, y se puede observar el inyector, la sonda optoelectrónica montada, así como su campo de visión en la cámara de combustión.

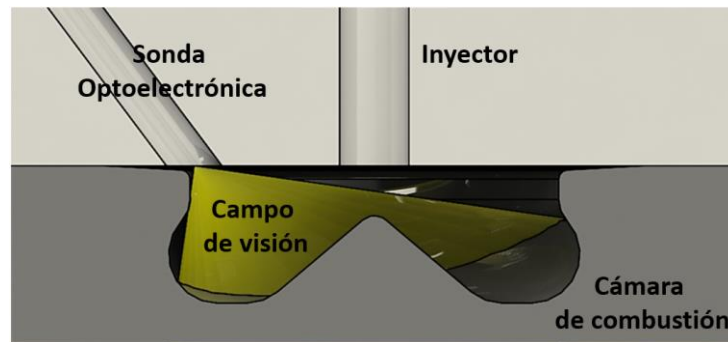


Figura 3.8. Montaje del pirómetro optoelectrónico en la configuración del motor.

3.4 Herramientas teóricas

3.4.1. Diagnóstico de la combustión. Calmec

Los modelos de diagnóstico de la combustión son una de las principales herramientas que se tiene para estudiar y analizar el proceso de combustión en todo tipo de motores. Como resultado fundamental proporcionan la ley de liberación de calor (HRL), y para ello es necesario proporcionarles como entradas tanto la señal de presión instantánea medida en el interior del cilindro, como una serie de datos del motor y de su funcionamiento derivados de la instrumentación utilizada ya descrita en apartados anteriores, así como de las características de los fluidos empleados.

Estos modelos suelen ser cero dimensionales, de una zona (especialmente para motores diésel) y están fundamentados en la resolución del primer principio de la termodinámica para sistemas abiertos y en la ecuación de estado.

El modelo de diagnóstico utilizado en el presente trabajo cumple lo anteriormente dicho y se denomina CALMEC [24]. Las diferencias más importantes entre la predicción del modelo y los resultados experimentales están relacionadas con las hipótesis asumidas, las cuales se describen a continuación:

- La presión se supone uniforme en la cámara de combustión. Esta hipótesis es válida ya que las velocidades del fluido y de propagación de llama son mucho más bajas que la del sonido.
- El fluido que evoluciona en la cámara es una mezcla de aire, combustible y productos quemados estequiométricamente. La consideración de los

productos quemados de manera estequiométrica como una especie es razonable si se considera una combustión por difusión, como es el caso en el presente trabajo.

- La mezcla que evoluciona se comporta como un gas perfecto. Esta hipótesis es razonablemente válida dentro del rango de presiones que hay en la cámara de combustión. La energía interna de la mezcla se calcula a partir de correlaciones en función de la temperatura para cada una de las especies ponderando con la fracción másica de cada especie. Las correlaciones para dicho cálculo se encuentran en [24].
- La temperatura media en el interior de la cámara de combustión es la utilizada en el cálculo de la energía interna de cada especie. Con esta suposición se comete un error para los productos quemados, sobre todo en los primeros instantes de la combustión. Posteriormente este error se reduce debido a la dilución y a la transmisión de calor.
- El modelo utiliza ensayos de motor arrastrado para ajustar sus propios coeficientes de película para así calcular el calor transmitido a las paredes. Como temperatura del gas se considera la temperatura media de la masa que evoluciona en el cilindro, y como temperatura de pared se considera un valor constante para todo el ciclo, pero diferenciando entre pistón, culata y cilindro. Las temperaturas de las paredes se calculan por medio de una correlación de tipo empírico que tiene en cuenta tanto el régimen como el grado de carga del motor.

En relación con las hipótesis que se acaban de describir, las ecuaciones fundamentales en las que se basa el modelo de diagnóstico son la ecuación de estado de los gases perfectos (12) y el primer principio de la termodinámica aplicado a la mezcla de gases que se encuentra en el interior del cilindro (13):

$$P \cdot V = m \cdot R_m \cdot T_m \quad (12)$$

$$d m u = -P dV + h_f dm_f - h_m dm_{bb} + Q_L - Q_W \quad (13)$$

donde P es la presión instantánea en la cámara de combustión medida en el ensayo experimental, V es el volumen total, siendo este volumen el formado por la cámara de combustión, el volumen del cilindro (variable con el ángulo de giro del cigüeñal) y una variación del volumen de acuerdo a las deformaciones mecánicas que se producen en el motor; m es la masa atrapada en el cilindro, su cálculo se hace teniendo en cuenta la masa admitida (aire + gases de escape recirculados), la masa de residuales y la de cortocircuito, la masa de blow-by y la masa de combustible inyectada; R_m es la constante de la mezcla que evoluciona en el cilindro, calculada como la media ponderada de las constantes individuales de cada uno de las especies que componen la mezcla; T_m es la temperatura de la mezcla que evoluciona dentro del cilindro; u es la energía interna específica de la masa atrapada; h_f es la

entalpía del combustible; m_f es la masa de combustible inyectada; h_m es la entalpía de los gases contenidos en el cilindro; m_{bb} es la masa de blow-by; Q_L es la tasa de calor liberado por la combustión (incógnita del problema) y por último Q_W representa la tasa de calor transmitido a las paredes.

En concreto se registraron muestras de presión del interior del cilindro de 100 ciclos consecutivos durante la realización de los ensayos, con el fin de compensar la variación ciclo a ciclo durante el funcionamiento del motor. Más tarde, los datos de presión de cada ciclo individual se suavizan empleando un filtro de paso bajo de series de Fourier. Una vez filtrados, los ciclos han sido promediados en su conjunto para producir una señal de presión del cilindro representativa, utilizada para la realización del análisis y diagnóstico de combustión.

Por lo tanto, tomando esta señal de presión, con la resolución de estas dos ecuaciones y una serie de cálculos derivados, el modelo de diagnóstico proporciona la HRL así como la evolución de diferentes variables físicas en el interior del cilindro y una serie de parámetros de inyección / combustión con carácter promedio, entre otros el inicio de inyección y el tiempo de retraso. En concreto se han obtenido, entre otros parámetros: la BMEP, definida como la presión media efectiva; el inicio de combustión, el cual se define como la posición de ángulo del cigüeñal en la que la liberación de calor acumulada ha alcanzado un valor de 2%; y el CA50, que se define como el ángulo del cigüeñal donde se ha quemado el 50% de la fracción de masa de combustible.

3.4.2. Apparent combustion time, ACT

El proceso de inyección-combustión en los motores diésel de inyección directa es un proceso dominado por mezcla, es decir, controlado por la física, sobretudo en combustiones convencionales en donde la combustión por difusión es la etapa predominante en el proceso. Por tanto, parece interesante tener un estimador del tiempo de mezcla aire/combustible durante el proceso de combustión por difusión que reúna las diferentes variables físicas que intervienen en el proceso y aporte luz acerca de cómo interaccionan. No obstante, resulta complejo definir relaciones físicas simples y fácilmente interpretables entre el proceso de inyección y combustión.

Una vía para afrontar este problema consiste en relacionar la tasa de inyección y de liberación de calor a través de un parámetro instantáneo que dependa de las condiciones instantáneas en el interior del cilindro, Apparent Combustion Time o ACT.

Por lo tanto, este parámetro va ser empleado para estimar la cantidad de mezcla de manera instantánea durante el proceso de combustión en los ensayos realizados.

Este parámetro se calcula, como se muestra en la Figura 3.9, donde se ha estudiado para un caso particular de una sola inyección. Se observa que el tiempo existente entre el instante que se ha inyectado un cierto porcentaje de la masa de combustible (punto de inyección o PoI) y el instante en que se quema este mismo

porcentaje de masa (punto de combustión, PoC), es la definición de ACT. Cabe destacar que esto no implica que todo el combustible inyectado en un momento dado se quemé después del ACT, sino que este parámetro solo representa el tiempo necesario para que el combustible inyectado esté listo para ser quemado.

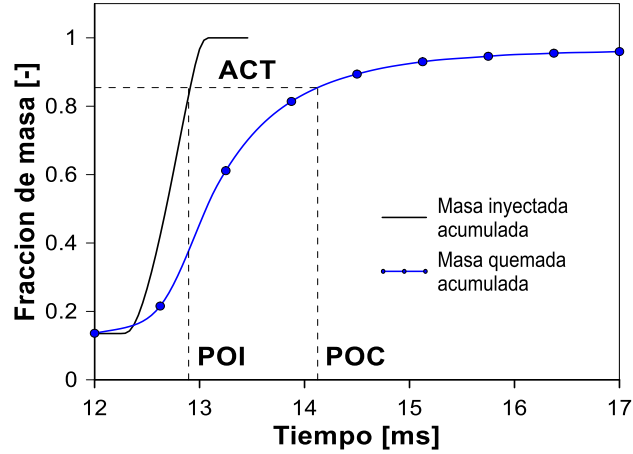


Figura 3.9. Definición del Apparent Combustion Time.

Por otra parte, el ACT no debe ser confundido con el tiempo de retraso, puesto que el ACT tiene un significado más genérico. Tan solo el valor de ACT correspondiente a la primera inyección de combustible coincide con el tiempo de retraso, como se muestra en la Figura 3.9. Este parámetro sin embargo presenta una evolución temporal para el resto de combustible inyectado.

Se puede apreciar esta evolución en la Figura 3.10, donde se ha graficado el parámetro ACT (línea continua azul) correspondiente con el mismo punto de operación que la Figura 3.9. También se muestra el parámetro ACT^{-1} en la Figura 3.10, ya que es éste el considerado como trazador de la evolución de la mezcla.

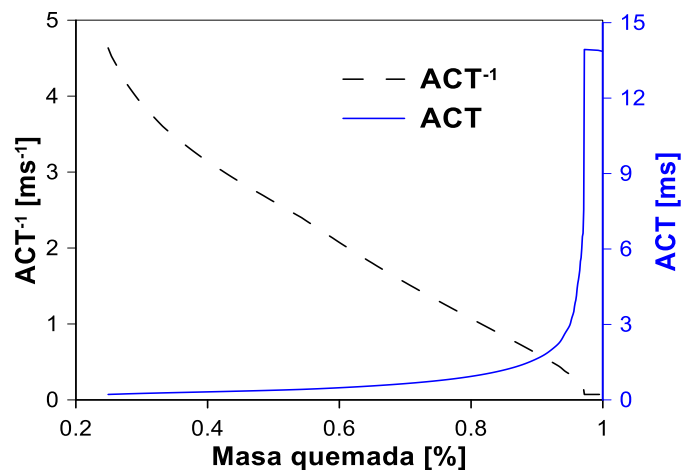


Figura 3.10. Evolución de los parámetros de ACT y ACT^{-1} para el mismo caso de la Figura 3.9.

4. Efecto de parámetros motorísticos en la oxidación del hollín

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados que se han obtenido tras ensayar en el motor policilíndrico con diferentes condiciones de operación. Se plasma en primer lugar la influencia de cada parámetro sobre la oxidación del hollín. Éstos son: el Swirl, la tasa de recirculación de gases de escape (EGR), la presión de inyección, la temperatura de admisión y parámetros medidos en la cámara de combustión como la densidad ambiente dentro de la cámara. En segundo lugar, se analizará el proceso de oxidación extendido a los diferentes puntos de funcionamiento del motor, mediante el análisis de la relación del parámetro de ACT^{-1} con la oxidación del hollín.

4.2 Metodología. Condiciones de ensayo

Las condiciones de operación del motor que se han ensayado pretenden plasmar un amplio rango del mapa motor. En particular se ensayaron puntos de funcionamiento a 2000 y 1500 rpm, con valores de 2 y 5 bar BMEP, y 8 y 14 bar BMEP respectivamente. Han sido variadas las estrategias de inyección (SOI y presión de inyección), los niveles de EGR, los valores de Swirl y presión de admisión y de escape. La estrategia de inyección consiste en dos inyecciones piloto seguidas de una inyección principal. En la Tabla 4.1 se recoge la información de los ensayos realizados para las variaciones de Swirl, de tasa de EGR y de CA50.

Condiciones de operación	2000rpm@ 2bar BMEP	2000rpm@ 5bar BMEP	1500rpm@ 8bar BMEP	1500rpm@ 14bar BMEP
Par [Nm]	37	87	132	220
Carga [%]	10	24	48	84
Presión de inyección [bar]	450	650	750	1050
Caudal combustible[kg/min]	0.039	0.071	0.079	0.138
$T_{admisión}$ [K]	318			
$P_{admisión}$ [bar]	1.191	1.388	1.353	1.756
P_{escape} [bar]	1.351	1.56	1.542	2.292
Caudal aire [kg/min]	2.172	2.619	1.787	2.31
SN [-]	1.4, 2, 2.5, 3			
EGR[%]	0, 14, 27	0, 11, 22	0, 5, 11	-
CA50 [° dPMS]	6, 11, 16, 20			11, 14, 17

Tabla 4.1. Tabla de ensayos para las variaciones de Swirl, tasa de EGR y CA50.

En la Tabla 4.2 se recogen los ensayos realizados para las variaciones de presión de inyección, de temperatura de admisión y de densidad. Estos ensayos pretenden centrarse en condiciones de baja carga del motor, por ello solo se ensayaron las variaciones de los parámetros motorísticos manteniendo constante la velocidad en 2000 rpm y variando la BMEP de 2 bar a 5 bar. Las variables variadas en estos ensayos son: la presión de inyección, la temperatura del aire de admitido y la densidad. En el caso de la presión de inyección, se ha ensayado desde 400 bar hasta 800 bar, la temperatura de admisión se mantuvo constante en 318 K y la densidad ambiente en el PMS se mantuvo constante también en 20.3 kg/m^3 y 23.3 kg/m^3 dependiendo de la carga del motor. En cuanto a la variación de la densidad ambiente en el PMS, el rango de valores fue definido considerando los valores de presión de admisión mínimo, medio y máximo capaces de ser proporcionados por el turbogrupo en cada condición de operación. La presión de inyección se mantuvo en 450 bar para el caso de 2 bar de BMEP y en 650 para el caso de 5 bar BMEP. La temperatura de admisión no fue modificada independientemente de la carga del motor, y se fijó en 313 K. Finalmente, la variación de la temperatura de admisión fue ensayada manteniendo constante la densidad ambiente en el PMS en 22 kg/m^3 para ambos puntos de operación. Con este objetivo, se ensayaron diferentes presiones de admisión, desde 1.24 bar hasta 1.33 bar (absoluta). La masa de combustible inyectada se mantuvo constante para cada carga del motor. Para todas las condiciones de operación del motor, se usó una estrategia de inyección simple (solamente inyección principal), con diferentes tiempos de inyección, mostrados en la Tabla 4.2. En los ensayos, se fijó el valor de Swirl en 1.4, con CA50 en 13 CAD medidos después del punto muerto superior (dPMS) y sin tasa de EGR.

Parámetro variado	Presión de inyección		Densidad ambiente PMS		Temperatura de admisión	
	2	5	2	5	2	5
BMEP [bar]	2	5	2	5	2	5
Tiempo de inyección [μs]	777/621 / 544	995/777 / 671	715	750	715	750
Presión de admisión [bar]	1.17	1.36	1.03/1.26/1.48	1.07/1.37/1.65	1.24/1.27/1.31/1.36	
Presión de escape [bar]	1.28	1.48	1.10/1.51/2.41	1.13/1.57/2.61	1.24/1.26/1.30/1.33	
$T_{\text{admission}}$ [K]	318		313		303/313/323/333	
$P_{\text{inyeccion}}$ [bar]	400/600/800		450	650	450	650
Densidad [kg/m^3]	20.3	23.2	18.1/22/25.6	18.5/23.5/28.1	22	
Caudal aire [kg/min]	2.29	2.64	2.04/2.49/2.88	2.11/2.71/3.20	2.53/2.53/2.54/2.57	

Tabla 4.2. Tabla de ensayos para las variaciones de presión de inyección, de temperatura y densidad.

4.3 Resultados

En la presente sección se plasmarán los resultados obtenidos tras llevar a cabo los diferentes ensayos, efectuando variaciones de los parámetros motorísticos nombrados anteriormente. Para facilitar el análisis, éste se va a realizar para un punto de operación específico. En concreto ha sido elegido el punto a 2000 rpm y 2 bar de BMEP debido a que la fiabilidad de la sonda es mayor en puntos de baja carga, como se ha explicado en la Sección 3.3.4.

4.3.1. Influencia de la variación del Swirl

El parámetro del Swirl es el movimiento de rotación del aire alrededor del eje del cilindro, y se origina durante el proceso de admisión. Por la geometría de las pipas de admisión, el aire entra al cilindro con un cierto momento angular que da lugar a la formación de una estructura que evoluciona hacia un vórtice forzado concéntrico al cilindro. La intensidad de tal vórtice o intensidad de Swirl al cierre de válvulas o en el PMI, depende de la geometría y la disposición de las pipas, y es posible controlarlo mediante la existencia de dos válvulas de admisión en lugar de solo una. Éstas permiten ejercer un mayor control sobre este parámetro, siendo una simple válvula de mariposa ubicada en una de las pipas la que permite incrementar o disminuir el Swirl; ya que el Swirl contribuye a distribuir el combustible en la cámara y mejorar la mezcla aire/combustible, pero un Swirl demasiado intenso puede dificultar el desarrollo de la combustión.

Ya se conoce la influencia de este parámetro en la combustión; un aumento del Swirl (SN) implica una mejora de la mezcla y por lo tanto una aceleración del proceso de combustión. En este sentido, si se mejoran las condiciones de combustión, las emisiones de hollín también se verán reducidas. Por lo tanto, se procede al análisis del impacto del SN en el proceso de oxidación del hollín, y para ellos se han empleado dos trazadores. Considerando el trabajo realizado por Gallo [15] y Huestis [16], se ha empleado el tiempo de vida media de la evolución temporal del factor de concentración volumétrica de hollín (KL) para así evaluar la reducción del hollín tras el EoI. Por otro lado, para evaluar la capacidad de mezcla y sus efectos en los procesos de combustión y por lo tanto, en las emisiones del hollín, se ha empleado el tiempo de vida media del parámetro ACT^{-1} .

En concreto se van a analizar las emisiones de hollín variando el Swirl a 1.4, 2, 2.5 y 3, manteniendo constante el valor de CA50 a 13 CAD dPMS y sin EGR. En las siguientes secciones se describe la metodología empleada para estimar ambos tiempos de vida media.

Análisis del KL

La Figura 4.1 muestra la evolución temporal del KL en el punto 2000rpm y 2bar BMEP para la variación del Swirl, manteniendo constante el resto de parámetros como se ha comentado anteriormente. Los valores de Swirl ensayados son 1.4, 2, 2.5 y 3. Cada curva representa el promedio de los 400 ciclos registrados tras el ensayo, junto a su desviación estándar.

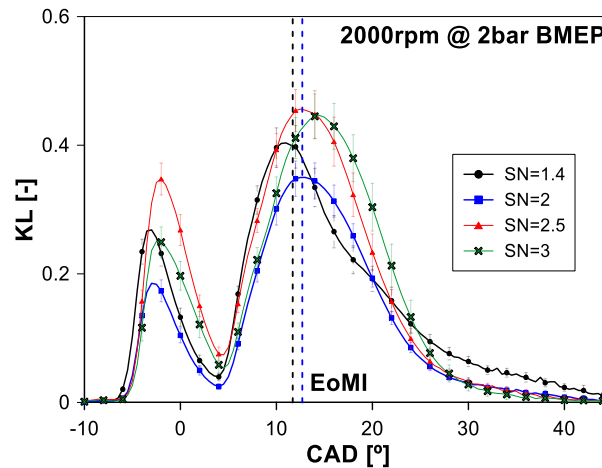


Figura 4.1. Evolución temporal del KL para la variación del Swirl en el punto 2000rpm @ 2bar BMEP.

Como ya se ha introducido en la Sección 2, durante los procesos de inyección de combustible, los dosados relativos en la longitud de *lift-off* son mayores y la fracción volumétrica de hollín aumenta en esta fase de la combustión. Se puede apreciar que la formación de hollín es el mecanismo dominante durante el proceso de inyección de combustible. Atendiendo a la Figura 4.1, las curvas de KL se pueden dividir en dos partes. La primera parte consiste en el periodo desde el inicio de inyección (SoI) hasta el final de la inyección principal (EoMI), y durante este periodo la concentración de hollín asociada a las dos primeras inyecciones piloto evoluciona hasta producir un primer pico de KL, seguido a continuación de un decrecimiento que está gobernado principalmente por la oxidación del hollín. Más tarde, éste parámetro vuelve a aumentar desde el inicio de la inyección principal hasta alcanzar un segundo pico de KL, periodo que está gobernado por la formación de hollín. La segunda parte consiste en el final del ciclo de combustión, la denominada *fase de combustión por difusión tardía*, desde el EoMI hasta el final del proceso de combustión (EoC). Cuando se ha completado la inyección de combustible, el fenómeno de formación de hollín empieza a mitigarse. Es entonces cuando el proceso de oxidación del hollín el que toma relevancia y se convierte en el mecanismo principal que rige el perfil de KL.

A pesar de que una cierta cantidad de hollín se oxida en la primera etapa, en este estudio solo va a ser considerada la oxidación ocurrida en la segunda parte, para así realizar el cálculo del parámetro de tiempo de vida media. Las dos inyecciones piloto representan solo un pequeño porcentaje del combustible inyectado,

incluso en el caso de 2bar de BMEP. Este hecho es más evidente a medida se aumenta la carga. Además, los procesos de combustión de estas dos inyecciones piloto son bastante premezclados. En consecuencia, se puede afirmar que la inyección principal domina en el mecanismo de formación de hollín.

Se puede considerar que las curvas de la segunda etapa en la Figura 4.1 siguen un decrecimiento exponencial tras el pico de KL de la inyección principal [15], y es posible cuantificar la tasa de oxidación mediante el cálculo del tiempo de vida media. La influencia del Swirl sobre el proceso de oxidación del hollín ha sido analizada gracias al cálculo de este parámetro sobre los ajustes exponenciales de los datos experimentales mostrados en la Figura 4.1.

Según el Swirl en cada ensayo, los intervalos de CAD para llevar a cabo el ajuste exponencial en las curvas son diferentes. Estos intervalos escogidos se muestran en la Tabla 4.3.

SN [-]	Intervalo de ajuste [CAD]	Valores R^2 [-]
1.4	11 - 45	0.9515
2	11.5 - 43	0.9803
2.5	11.5 - 42	0.9890
3	13 - 40	0.9795

Tabla 4.3. Intervalo utilizado para el ajuste exponencial y los valores de R^2 para la variación de Swirl de KL en el punto de operación 2000rpm @ 2bar BMEP.

Cada intervalo ha sido escogido basándose en un estudio detallado de la forma de cada curva. En estos ensayos, el inicio de los ajustes exponenciales comienza en el pico de KL máximo y se encuentra entre 11 y 13 CAD dPMS dependiendo del SN. El final del rango del ajuste se sitúa alrededor de 40 - 45 CAD dPMS, donde la evolución del KL se aproxima a cero. Los valores de R^2 , también mostrados en la Tabla 4.3, indican un nivel de precisión adecuado del ajuste exponencial realizado, cuyos valores están dentro del intervalo 0.95 - 0.99.

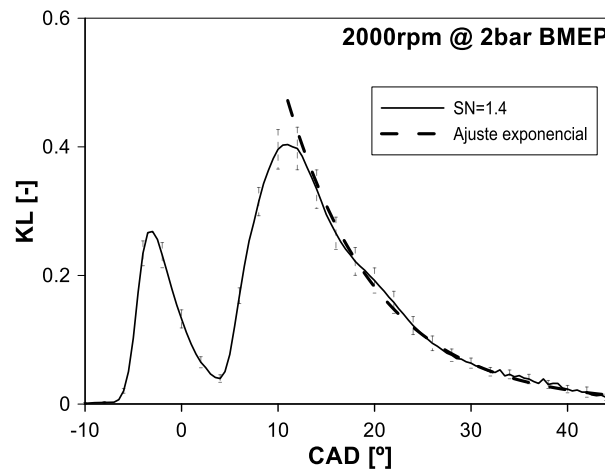


Figura 4.2. Evolución de KL del punto 2000rpm @ 2bar BMEP para SN=1.4 y su ajuste exponencial.

Para ilustrar el procedimiento, la Figura 4.2 representa la evolución temporal de los datos experimentales de KL junto a su desviación estándar, así como el correspondiente ajuste exponencial para el caso 2000rpm y 2bar de BMEP para el ensayo con 1.4 de Swirl.

Por definición, el tiempo de vida media que se aplica a este tipo de curvas, decrecimientos exponenciales, viene denotado por $t_{1/2}$ y viene dado por la expresión:

$$KL = c \cdot e^{\frac{-\ln(2) \cdot x_{CAD}}{t_{1/2}}} \quad (14)$$

Donde c es una constante y x_{CAD} se trata del ángulo de cigüeñal dPMS en CAD.

La Figura 4.3 muestra los valores de tiempo de vida media de KL, $t_{1/2KL}$, y sus desviaciones estándar, obtenidos del ajuste exponencial para los diferentes ensayos realizados para la variación de Swirl.

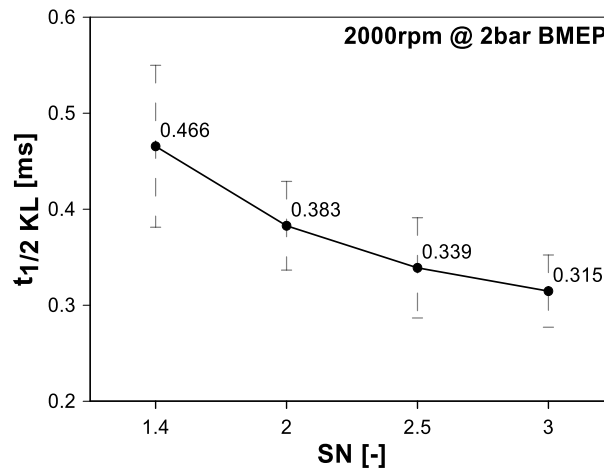


Figura 4.3. Tiempo de vida media de KL, $t_{1/2 KL}$, calculado para la variación de Swirl en la condición de operación 2000rpm @ 2bar BMEP.

Como era de esperar [25], se observa que los tiempos de vida media decrecen con el aumento de Swirl. La velocidad angular dentro del cilindro en el caso de Swirl elevados (SN=3) es mayor que cuando éste es bajo (SN=1.4). Debido a la alta velocidad angular del flujo de aire en el cilindro se produce un aumento de la turbulencia y la vorticidad. Son estos fenómenos los que afectan a la oxidación del hollín, puesto que producen una mejora del proceso de mezcla durante el periodo de la segunda etapa y por lo tanto se incrementa la velocidad de oxidación del hollín, es decir, tiempos de vida media menores, cuando el Swirl aumenta.

Análisis del ACT^{-1}

A continuación, se procede al análisis del trazador de mezcla introducido anteriormente, ACT^{-1} . La Figura 4.4 muestra la evolución temporal de este parámetro en el mismo punto de funcionamiento para diferentes números de Swirl ensayados.

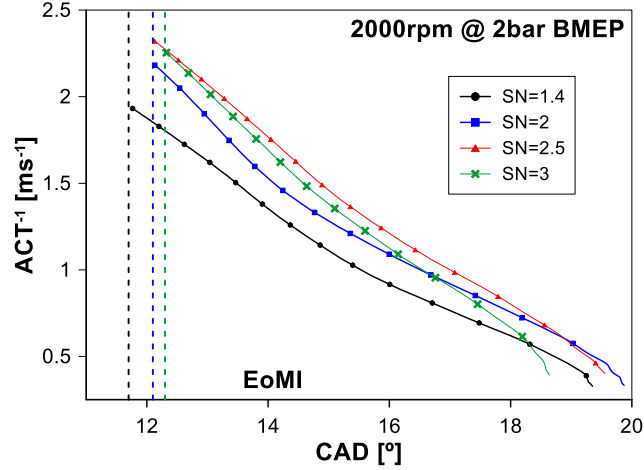


Figura 4.4. Evolución temporal del ACT^{-1} para la variación de Swirl en el punto 2000rpm @ 2bar BMEP.

Cada curva representa el promediado de 100 ciclos y su desviación estándar. Al igual que en el análisis de KL, solamente la segunda etapa del ciclo de combustión se ha seleccionado para realizar el estudio de la tasa de oxidación, es decir, el intervalo de estudio es desde el EoMI hasta el final de la combustión (EoC). Algunos investigadores [15] han usado los perfiles de RoHR directamente para correlacionar la oxidación del hollín con la última etapa de combustión por difusión. A pesar de que la RoHR proporciona información muy útil, el efecto particular de las variables termodinámicas (densidad del aire dentro del cilindro y/o la concentración de oxígeno) así como la cantidad de movimiento del chorro no se pueden deducir o extraer directamente. En este aspecto, como se ha explicado también en la Sección 3.4.2, el parámetro ACT^{-1} puede ser considerado como un trazador de la mezcla. De forma experimental, el ACT^{-1} depende de la densidad del aire dentro del cilindro, ρ_a , la velocidad de inyección, u_0 , el dosado equivalente, Φ_0 , y la fracción molar de oxígeno, $[O_2]$; relacionadas de la siguiente manera:

$$ACT^{-1} = \frac{\rho_a^{0.65} \cdot u_0 \cdot [O_2]^{0.5} \cdot \Phi_0^{-1}}{K} \quad (15)$$

Para cuantificar la influencia de la capacidad de mezcla en el proceso de oxidación del hollín, se ha empleado también un ajuste de decrecimiento exponencial para las curvas de ACT^{-1} . En estos casos los intervalos de CAD para ajustar cada ensayo son similares a los del KL, y se muestran en la Tabla 4.4. De igual modo que en el anterior análisis, el ajuste exponencial de cada curva se inicia en el EoMI. Los perfiles decaen entre 11 y 13 CAD dPMS y el final del ajuste exponencial se

encuentra alrededor del rango 18 - 20 CAD dPMS. Los valores de R^2 indican un precisión adecuada de los ajustes, como se muestra en la Tabla 4.4 (0.98-0.99).

SN [-]	Intervalo de ajuste [CAD]	Valores R^2 [-]
1.4	11.7 - 19	0.9884
2	12.1 - 18.5	0.9899
2.5	12.1 - 18	0.9955
3	12.3 - 18	0.9960

Tabla 4.4. Intervalo utilizado para el ajuste exponencial y los valores de R^2 para la variación de Swirl de ACT^{-1} en el punto de operación 2000rpm @ 2bar BMEP.

Para clarificar la metodología y explicar el procedimiento, de igual manera que para el caso del KL, en la Figura 4.5 se muestra la evolución temporal del ACT^{-1} , junto a su correspondiente ajuste y su desviación estándar, del punto 2000rpm y 2bar de BMEP ensayado con el Swirl en 1.4.

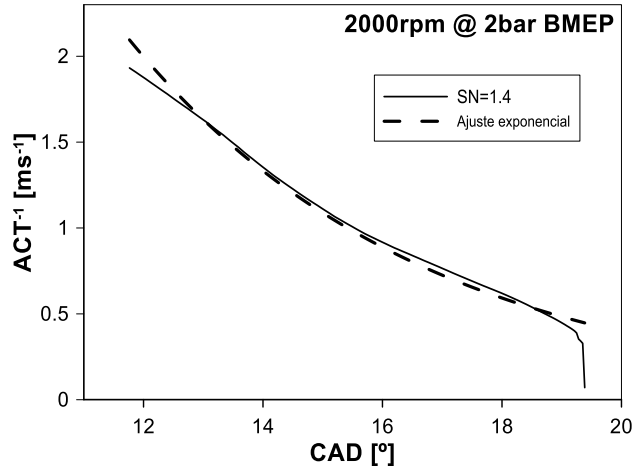


Figura 4.5. Evolución del ACT^{-1} en el punto 2000rpm @ 2bar BMEP para SN=1,4 y su ajuste exponencial.

A partir del mencionado ajuste, el tiempo de vida media, $t_{1/2}$, viene dado por su definición:

$$ACT^{-1} = b \cdot e^{\frac{-\ln 2 \cdot x_{CAD}}{t_{1/2}}} \quad (16)$$

A continuación, la Figura 4.6 muestra los resultados de los tiempos de vida media para el ACT^{-1} , con su valor promedio y su desviación estándar, para la variación de Swirl. Los tiempos de vida media del ACT^{-1} , $t_{1/2ACT^{-1}}$, decrecen a medida aumenta el Swirl. Cuanto menor es el valor de $t_{1/2ACT^{-1}}$ mayor es la capacidad de mezcla. Si se considera constante la densidad del aire dentro del cilindro, la velocidad de inyección y la concentración de oxígeno entre los diferentes casos de SN ensayados, un valor mayor de SN produce un aumento de la turbulencia [25],

que consecuentemente, reduce el tiempo necesario para quemar la misma cantidad de combustible. Por lo tanto, se confirma la mejora del proceso de mezcla aire/combustible.

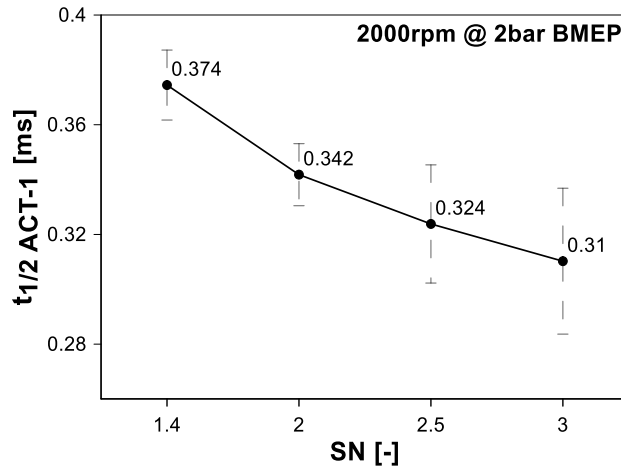


Figura 4.6. Tiempo de vida media de ACT^{-1} , $t_{1/2} ACT^{-1}$, calculado para la variación de Swirl en la condición de operación 2000rpm @ 2bar BMEP.

Si se consideran las dos figuras que muestran los tiempos de vida media, tanto del parámetro de KL como del de ACT^{-1} , Figura 4.3 y Figura 4.6, se puede afirmar que las tendencias obtenidas son iguales para ambos parámetros. Así pues, el trazador de la capacidad de mezcla puede ser usado para explicar el proceso de oxidación del hollín en las siguientes secciones.

4.3.2. Influencia de la variación de CA50

El siguiente parámetro de influencia en el proceso de oxidación del hollín que se analiza es el instante, en ángulo de cigüeñal, cuando se ha quemado el 50% de la fracción de masa inyectada, que se denomina como fase de combustión y se abreviará como CA50. Este fenómeno se puede controlar variando el momento, también en ángulo, del inicio de la inyección principal de combustible, y se tomará como referencia el punto muerto superior para denominarlo.

La variación del momento de la inyección principal implica actuar sobre el desarrollo del proceso de combustión, puesto que significa inyectar el combustible en condiciones de temperatura y de presión en la cámara de combustión diferentes.

En concreto para el punto 2000rpm y 2bar BMEP, el rango de variación del CA50 ha sido desde 6 hasta 20 CAD después del punto muerto superior (dPMS). Para la realización de los ensayos, se mantiene constante el Swirl en 1.4 y con tasa de EGR nula. Éste rango de CA50 permite mantener la presión máxima dentro del cilindro por debajo de 160 bar (límite mecánico máximo).

De igual manera que en el análisis anterior, se ha grabado 400 ciclos y se siguió una metodología de procesado similar. A continuación, se han realizado los ajustes exponenciales de la evolución temporal del KL y del ACT^{-1} después del EoMI y se han calculado los tiempos de vida media para ambos parámetros empleando las definiciones explicadas en la sección anterior.

En la Tabla 4.5 se muestran los intervalos de CAD escogidos para la realización de los ajustes, tanto para el parámetro de KL como el de ACT^{-1} , y los valores de R^2 obtenidos en cada uno.

CA50 [°]	KL		ACT^{-1}	
	Intervalo de ajuste [CAD]	Valores R^2 [-]	Intervalo de ajuste [CAD]	Valores R^2 [-]
6	4 - 37.5	0.9355	4 - 11	0.9853
11	9 - 39	0.9986	9 - 17	0.9652
16	13 - 42.3	0.9143	13 - 21	0.9512
20	17 - 45	0.9009	17 - 25	0.9798

Tabla 4.5. Intervalos utilizados para los ajustes exponenciales y sus valores de R^2 para la variación de CA50 de KL y de ACT^{-1} en el punto 2000rpm y 2bar de BMEP.

Es interesante destacar que para cada condición de operación el inicio es distinto. Este hecho es debido a que el CA50 se ve retrasado y por lo tanto el inicio de la combustión también se retrasa. La duración de la combustión es bastante similar, aproximadamente de 30 CAD, independientemente del CA50. Los valores de R^2 superan en todos los casos el valor de 0.9, lo que indica una precisión lo suficientemente buena.

Análisis del KL

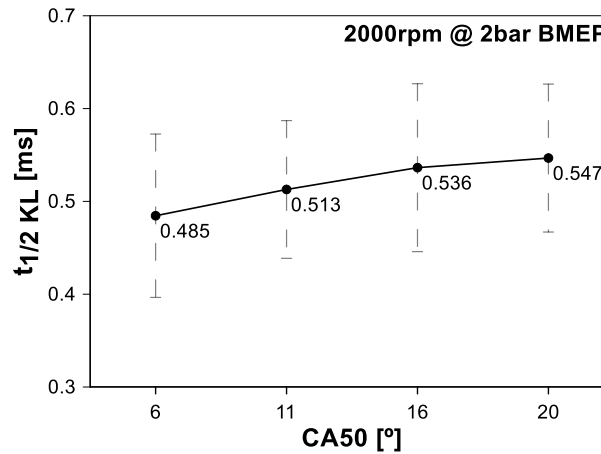


Figura 4.7. Tiempo de vida media de KL, $t_{1/2 KL}$, calculado para la variación de CA50 en la condición de operación 2000rpm @ 2bar BMEP.

En la Figura 4.7 se representan el valor promedio y su desviación estándar de los tiempos de vida media de KL. Se puede deducir que si se retrasa la fase de combustión, los tiempos de vida media del KL se ven aumentados. Un retraso del CA50 produce una mayor duración del proceso de combustión y en consecuencia una disminución del decrecimiento del valor de KL durante la etapa final del ciclo de combustión, ya que el desarrollo de la combustión es más lento [26]. Esto implica un proceso de oxidación del hollín más pobre y por lo tanto, los tiempos de vida media del KL aumentan, como se puede apreciar en la Figura 4.7.

Análisis del ACT^{-1}

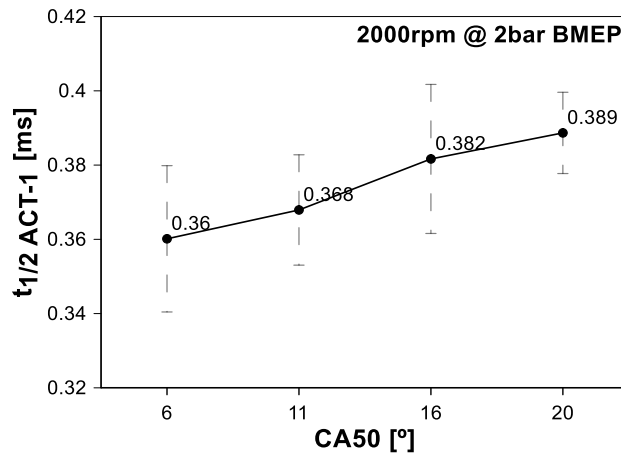


Figura 4.8. Tiempo de vida media de ACT^{-1} , $t_{1/2} ACT^{-1}$, calculado para la variación de CA50 en la condición de operación 2000rpm @ 2bar BMEP.

La Figura 4.8 muestra el valor promedio y la desviación estándar de los tiempos de vida media del ACT^{-1} . Cuando el CA50 se ve retrasado el tiempo de vida media del ACT^{-1} aumenta. En este sentido, si el inicio de la inyección (SoI) se ve también retrasado, el CA50 también se retrasa. Por lo tanto, la mezcla aire/combustible y el proceso de combustión tienen lugar durante la carrera de expansión. Las condiciones dentro del cilindro y de la cámara de combustión son peores (la presión y la temperatura dentro del cilindro son menores y por lo tanto, la densidad también lo es), de esta manera se produce un aumento del $t_{1/2} ACT^{-1}$.

Al igual que en el estudio previo, ambos tiempos de vida media, $t_{1/2} KL$ y $t_{1/2} ACT^{-1}$, presentan tendencias similares. La disminución de la capacidad de mezcla, ya demostrada, aumenta el $t_{1/2} ACT^{-1}$ debido a una menor densidad y temperatura dentro del cilindro, y este hecho está directamente relacionado con una oxidación de hollín más pobre. Esto se podrá observar en el posterior estudio de la relación entre la capacidad de mezcla y el tiempo de vida media de la oxidación del hollín.

4.3.3. Influencia de la variación de EGR

La tasa de EGR surge de la necesidad de reducir los contaminantes en los motores diésel, en concreto se trata de una solución activa encargada de reducir las emisiones de NOx, tan perjudiciales para la salud humana y que son características del motor diésel. Estas tienen su origen a altas temperaturas de combustión. La recirculación de gases de escape aumenta la cantidad de gases residuales retenidos en el cilindro al cerrar la admisión. El efecto conjunto, por una parte, de que el calor específico sea mayor que el del aire por la concentración de CO_2 y de vapor de agua, y por otra, de la reducción de la velocidad de combustión por compuestos

inertes, reduce significativamente la temperatura de la llama y con ello la formación de NO_x.

Ya es conocido que el uso de EGR produce un aumento de las emisiones de PM y de HC, sobre todo a elevados grados de carga, por lo que este sistema es normalmente empleado a grados de carga bajos o medios. Así pues, se pretende estudiar el impacto de ese sistema en las emisiones de hollín, puesto que el propósito de reducir tanto el NO_x como la emisión de partículas de hollín requiere de un *trade-off*.

En concreto, en esta sección se va a analizar la oxidación del hollín variando los niveles de EGR, manteniendo constantes el Swirl en 1.4 y el CA50 en 13 CAD dPMS. Como se ha nombrado anteriormente, el punto de operación a 1500rpm y 14bar BMEP no ha podido ser ensayado con esta variación de EGR debido a que se trata de un punto de alta carga que no permite una disminución de la concentración de oxígeno en la admisión sin generar inestabilidad en la combustión (Tabla 4.1). El porcentaje máximo de EGR en cada punto de operación fue definido considerando como límite el FSN=3 para las emisiones de hollín en el escape. En particular para el punto de operación 2000rpm y 2bar BMEP, la tasa máxima de EGR fue 27%. De igual manera que los dos estudios anteriores, se grabó la evolución temporal de KL y de ACT^{-1} para 400 ciclos y se siguió la misma metodología de procesado. El ajuste de decrecimiento exponencial es empleado también en este caso para el ajuste de las curvas de KL y de ACT^{-1} , tras el EoMI en la última fase de la combustión.

Los intervalos seleccionados para la realización de los ajustes en cada ensayo, junto a los valores de R^2 obtenidos, se muestran en la Tabla 4.6.

EGR [%]	KL		ACT^{-1}	
	Intervalo de ajuste [CAD]	Valores R^2 [-]	Intervalo de ajuste [CAD]	Valores R^2 [-]
0	11 - 45	0.9503	10.8 - 18	0.9862
14	11.5 - 45	0.9689	11.3 - 18	0.9924
27	12.5 - 48	0.9171	11.3 - 18	0.9980

Tabla 4.6. Intervalos utilizados para los ajustes exponenciales y sus valores de R^2 para la variación de EGR de KL y de ACT^{-1} en el punto 2000rpm y 2bar de BMEP.

Análisis del KL

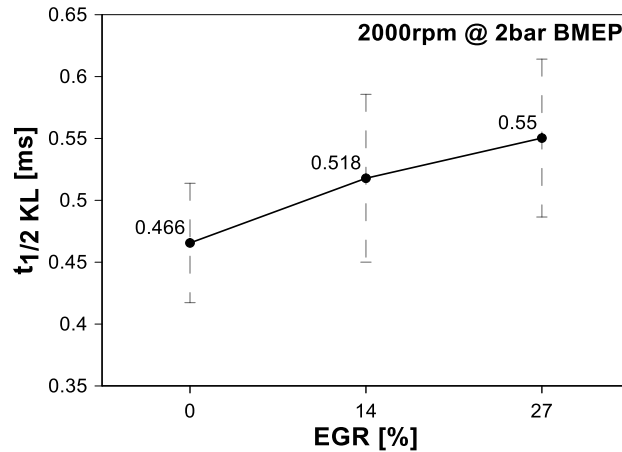


Figura 4.9. Tiempo de vida media de KL, $t_{1/2 KL}$, calculado para la variación de EGR en la condición de operación 2000rpm @ 2bar BMEP.

Varios investigadores [27] ya han indicado en sus artículos que el proceso de oxidación del hollín se empeora con un aumento de tasa de EGR debido a una menor disponibilidad de oxígeno, y esta tendencia es la que se puede apreciar en la Figura 4.9. En concreto, los tiempos de vida media del KL aumentan cuando la tasa de EGR aumenta. Además, cuanto mayor es la tasa de EGR, menos es la temperatura de combustión debido al incremento de la concentración de las especies no reactivas.

Análisis del ACT^{-1}

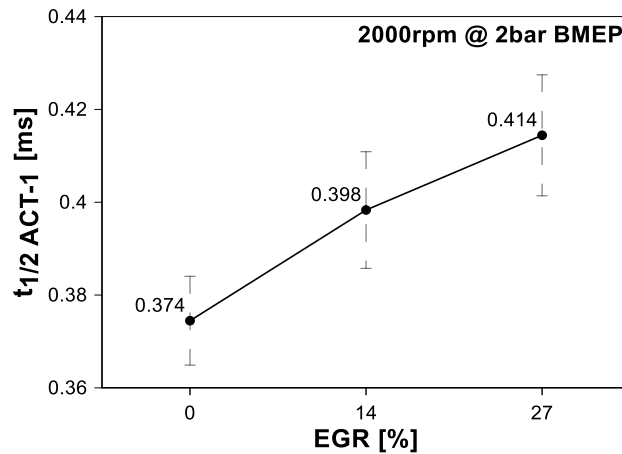


Figura 4.10. Tiempo de vida media de ACT^{-1} , $t_{1/2 ACT^{-1}}$, calculado para la variación de EGR en la condición de operación 2000rpm @ 2bar BMEP.

En la Figura 4.10 se muestra el promedio y la desviación estándar de los tiempos de vida media del ACT^{-1} . A medida que se aumenta la tasa de EGR la capacidad de mezcla se empeora implicando un mayor $t_{1/2 ACT^{-1}}$.

Al igual que en caso de SN y el CA50, las tendencias de ambos tiempos de vida media son las mismas. La ya demostrada disminución del proceso de mezcla debido a la baja concentración de oxígeno está directamente relacionado con una menor oxidación del hollín.

4.3.4. Influencia de la variación de densidad

La densidad dentro de la cámara de combustión en un motor diésel es un parámetro que no es posible medirlo ni variarlo de forma directa.

Para ello ha sido necesario el software creado en el CMT, llamado SiCiclo, que permite realizar el cálculo del ciclo de combustión según el punto de funcionamiento del motor, variando la presión y la temperatura de admisión, entre otras muchas funciones. De esta manera, para ensayar la variación de densidad deseada se actúa por un lado, variando la presión de admisión que la turbina es capaz de suministrar, según lo cerrados o abiertos que estén los alabes desde el valor máximo hasta el mínimo, y corrigiendo con la temperatura de admisión, con el fin de obtener el valor deseado de densidad dentro de la cámara de combustión.

En esta sección será analizado el proceso de oxidación del hollín ensayando para diferentes densidades en la cámara de combustión, manteniendo la presión de inyección en 450 bar para el caso de 2 bar de BMEP y en 650 para el caso de 5 bar BMEP. La temperatura de admisión no fue modificada independientemente de la carga del motor, y se fijó en 313 K. En particular, para el punto 2000 rpm y 2 bar BMEP, el valor mínimo, medio y máximo de densidad va acorde a los valores de presión de admisión que el turbogruppo podía proporcionar, y son de 18, 22 y 26 kg/m^3 , respectivamente. Se obtuvo la evolución temporal de KL y de ACT^{-1} para 400 ciclos, igual que en los anteriores análisis, y la metodología de procesado fue idéntica. A continuación, se han realizado los ajustes exponenciales de ambos parámetros después del EoI, para así calcular los tiempos de vida media, tanto del KL como del ACT^{-1} , aplicando el mismo proceso que en las secciones posteriores.

En la Tabla 4.7 recoge los intervalos de CAD escogidos para la realización de los ajustes exponenciales, tanto para el parámetro de KL como el de ACT^{-1} , además de los valores de R^2 obtenidos en cada uno de ellos, que como se puede observar proporcionan una fiabilidad aceptable.

φ_{PMS} [kg/m^3]	KL		ACT^{-1}	
	Intervalo de ajuste [CAD]	Valores R^2 [-]	Intervalo de ajuste [CAD]	Valores R^2 [-]
18	18 - 45	0.9205	16 - 52	0.9033
22	17 - 42	0.9401	16 - 51	0.9235
26	17 - 42	0.9544	17 - 51	0.9653

Tabla 4.7. Intervalos utilizados para los ajustes exponenciales y sus valores de R^2 para la variación de densidad de KL y de ACT^{-1} en el punto 2000rpm y 2bar de BMEP.

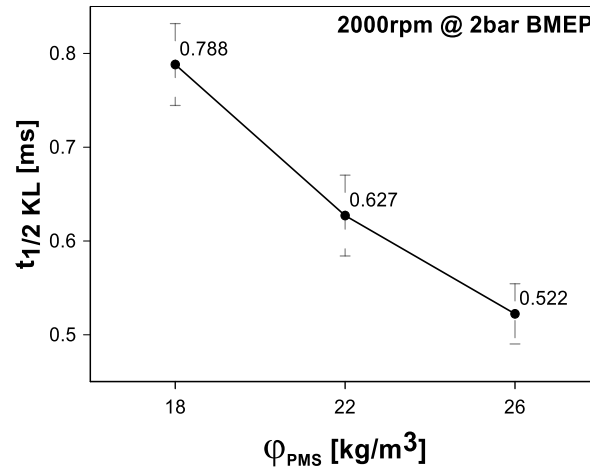
Análisis del KL

Figura 4.11. Tiempo de vida media de KL, $t_{1/2 KL}$, calculado para la variación de densidad en la condición de operación 2000rpm @ 2bar BMEP.

El valor promedio y la desviación estándar de los tiempos de vida media de KL, $t_{1/2 KL}$, son representados en la Figura 4.11, donde es fácilmente deducible que si las condiciones en la cámara de combustión mejoran, es decir, una mayor densidad al cierre de las válvulas en la cámara de combustión, los tiempos de vida media del KL se ven reducidos. Esto se traduce en una mejora del proceso de oxidación del hollín en la última etapa de la combustión, puesto que unas condiciones más favorables para el proceso de combustión dentro de la cámara, implican que se alcanzan unos valores tanto de temperatura como de presión mayores.

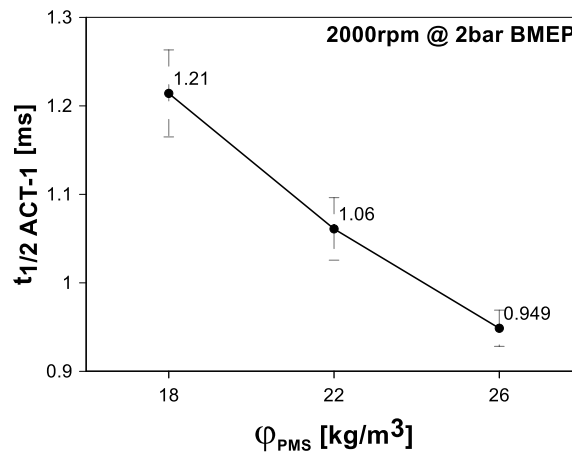
Análisis del ACT^{-1} 

Figura 4.12. Tiempo de vida media de ACT^{-1} , $t_{1/2 ACT^{-1}}$, calculado para la variación de densidad en la condición de operación 2000rpm @ 2bar BMEP.

La Figura 4.12 representa el valor promedio junto a la desviación estándar de los tiempos de vida media del parámetro de ACT^{-1} . Cuando la densidad dentro

de la cámara de combustión aumenta, el tiempo de vida media del ACT^{-1} disminuye. Consecuentemente, la disminución de este parámetro implica que la capacidad de mezcla aire/combustible durante la última etapa de combustión se ve incrementada cuando las condiciones dentro de la cámara de combustión son más ricas, favoreciendo también el proceso de oxidación del hollín.

Se puede afirmar, de igual manera que en los análisis anteriores, que las tendencias obtenidas de ambos parámetros, $t_{1/2\text{ KL}}$ y $t_{1/2\text{ ACT}^{-1}}$, son muy similares, confirmando así la estrecha relación entre la oxidación de hollín y la capacidad de mezcla.

4.3.5. Influencia de la variación de temperatura de admisión

En esta sub-sección se analiza el impacto de la variación de temperatura de admisión sobre el proceso de oxidación del hollín.

Este parámetro es controlado mediante la variación de la temperatura del intercooler. Los ensayos han sido realizados manteniendo constante la densidad ambiente en el PMS en $22\text{ kg}/m^3$. En este caso, para el punto de funcionamiento a 2000 rpm y 2 bar de BMEP, los valores de temperatura de admisión varían desde 303 hasta 333 K. El límite menor de temperatura de admisión viene impuesto por la temperatura mínima del intercooler, y el límite superior viene determinado por el valor máximo de temperatura del aire aguas abajo que puede generar el compresor.

También en este caso, la evolución temporal de KL y de ACT^{-1} ha sido grabada para 400 ciclos y la misma metodología de procesado ha sido empleada. Posteriormente, se ha realizado el ajuste de decrecimiento exponencial tras el EoI, tanto para el parámetro de KL como para el de ACT^{-1} , para a continuación calcular los tiempos de vida media de cada curva y cada parámetro.

Los intervalos escogidos para la realización del ajuste exponencial se muestran en la Tabla 4.8, además de los valores de R^2 asociados a cada uno de ellos.

Los valores de R^2 superan en todos los casos el valor de 0.9, lo que indica una precisión aceptable.

T_{adm} [K]	KL		ACT^{-1}	
	Intervalo de ajuste [CAD]	Valores R^2 [-]	Intervalo de ajuste [CAD]	Valores R^2 [-]
303	10 - 46	0.9067	13.5 - 98	0.9309
313	10 - 46.5	0.9002	13.3 - 96	0.9382
323	8.5 - 44.5	0.9004	11.6 - 97.2	0.9463
333	8.5 - 39.5	0.9403	11.5 - 92.5	0.9449

Tabla 4.8. Intervalos utilizados para los ajustes exponenciales y sus valores de R^2 para la variación de temperatura de admisión de KL y de ACT^{-1} en el punto 2000rpm y 2bar de BMEP.

Análisis del KL

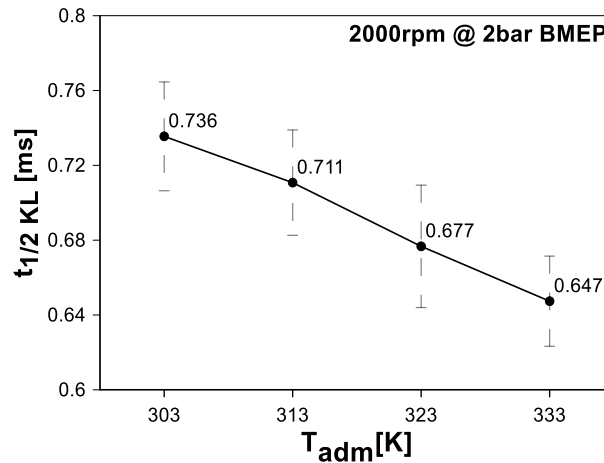


Figura 4.13. Tiempo de vida media de KL, $t_{1/2 KL}$, calculado para la variación de temperatura de admisión en la condición de operación 2000rpm @ 2bar BMEP.

En la Figura 4.13 se observa la tendencia que siguen los tiempos de vida media de KL para la variación de temperatura de admisión. Como otros investigadores ya han afirmado [28], el proceso de oxidación del hollín mejora con un aumento de temperatura de admisión. Este comportamiento puede observarse claramente en la Figura 4.13. Es destacable que los tiempos de vida media de KL son muy similares entre ellas debido a la ligera variación en los valores de temperatura de admisión que ha sido posible ensayar (una variación de 40 K).

Análisis del ACT^{-1}

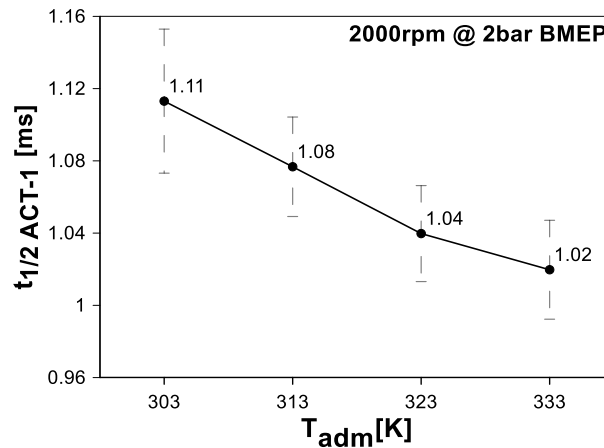


Figura 4.14. Tiempo de vida media de ACT^{-1} , $t_{1/2 ACT^{-1}}$, calculado para la variación de temperatura de admisión en la condición de operación 2000rpm @ 2bar BMEP.

La Figura 4.14 muestra la tendencia que siguen los tiempos de vida media de ACT^{-1} para la variación de temperatura de admisión. Cuando la temperatura del aire admitido aumenta, la capacidad de mezcla se ve mejorada implicando un tiempo de vida, $t_{1/2 ACT^{-1}}$, media más corto.

4.3.6. Influencia de la variación de presión de inyección

Ya ha sido comentado anteriormente, que actuar sobre el chorro de combustible implica actuar sobre el desarrollo del proceso de combustión. Ya es sabido que un aumento de la presión de inyección favorece aún más la atomización, mejorando el proceso de mezcla y evaporización, por lo que se acelera la combustión y se disminuye la formación de hollín, pero aumentando posiblemente las emisiones de NOx. Es de esperar que esta variable del motor también influya en la posterior oxidación del hollín y no solo en la formación como ya se conoce.

Más concretamente, un aumento de la presión de inyección produce un incremento de aire englobado en el chorro de combustible aguas arriba de la longitud de *lift-off* (despegue de llama, LOL), lo que conlleva una disminución del dosado relativo de *lift-off* (ϕ_{LOL}) y por lo tanto, una disminución de formación de hollín [16]. Una reducción en las emisiones de hollín es por consecuencia obtenida cuando la presión de inyección aumenta.

Para el punto de funcionamiento que estamos analizando, 2000rpm y 2bar BMEP, la presión de inyección varía desde 400 hasta 800 bar, mientras el resto de parámetros del motor se mantienen constantes. De igual forma que para el resto de estudios, se ha almacenado la evolución temporal de KL y ACT^{-1} para 400 ciclos. Posteriormente, se realizó un ajuste de decrecimiento exponencial tras el EoI.

En la Tabla 4.9 se recogen los intervalos de CAD escogidos para la realización de los ajustes exponenciales para cada ensayo, tanto para el parámetro de KL como el de ACT^{-1} , además de los valores de R^2 obtenidos en cada uno de ellos, que como se puede observar proporcionan una precisión suficientemente buena.

P_{iny} [bar]	KL		ACT^{-1}	
	Intervalo de ajuste [CAD]	Valores R^2 [-]	Intervalo de ajuste [CAD]	Valores R^2 [-]
400	12 - 43	0.9346	11 - 50	0.9423
600	14 - 43	0.9366	12 - 51	0.9211
800	15 - 43	0.9519	13 - 53	0.9479

Tabla 4.9. Intervalos utilizados para los ajustes exponenciales y sus valores de R^2 para la variación de presión de inyección de KL y de ACT^{-1} en el punto 2000rpm y 2bar de BMEP.

Análisis del KL

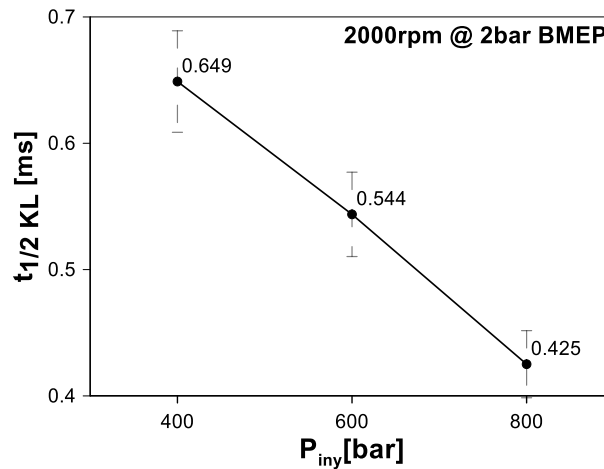


Figura 4.15. Tiempo de vida media de KL, $t_{1/2 KL}$, calculado para la variación de presión de inyección en la condición de operación 2000rpm @ 2bar BMEP.

La Figura 4.15 muestra el valor promedio de los tiempos de vida media de KL, $t_{1/2 KL}$, así como la desviación estándar de cada uno de ellos, para cada uno de los diferentes valores de presión de inyección ensayados. Como ya se ha comentado, un aumento de la presión de inyección conlleva una disminución de hollín. En concreto, es posible afirmar que los tiempos de vida media de KL disminuyen con un aumento de la presión de inyección.

Análisis del ACT^{-1}

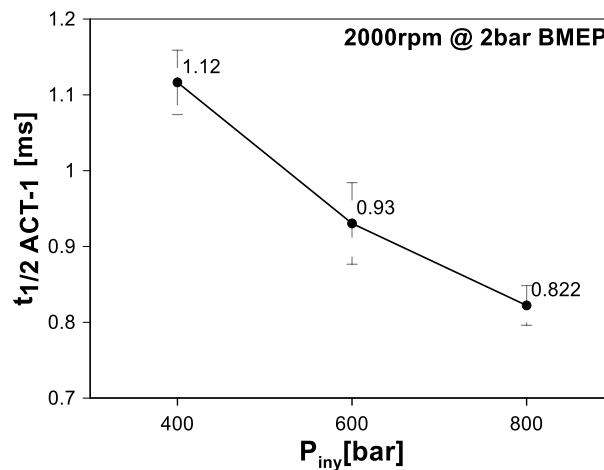


Figura 4.16. Tiempo de vida media de ACT^{-1} , $t_{1/2 ACT^{-1}}$, calculado para la variación de presión de inyección en la condición de operación 2000rpm @ 2bar BMEP.

En la Figura 4.16 se representa el resultado de los tiempos de vida media de ACT^{-1} , su valor promedio y la desviación estándar, para la variación de presión de inyección. Los tiempos de vida media de ACT^{-1} , $t_{1/2 ACT^{-1}}$, disminuyen

cuando la presión de inyección aumenta. Considerando constante la densidad ambiente dentro del cilindro y la concentración de oxígeno disponible entre los diferentes casos ensayados, una mayor presión de inyección produce un aumento del aire total englobado en el combustible, lo que resulta en una mejora del proceso de oxidación del hollín. Además, el momento producido por el chorro en el caso de alta presión de inyección ($P_{iny} = 800 \text{ bar}$) es mayor que el generado con baja presión ($P_{iny} = 400 \text{ bar}$). Por lo tanto, el aumento del momento del chorro produce un aumento del movimiento del aire dentro del cilindro. Este aumento de movimiento afecta a la oxidación del hollín intensificando la capacidad del proceso de mezcla durante la última etapa de la combustión y por lo tanto, la tasa de oxidación de hollín aumenta cuando la presión de inyección también lo hace [16].

4.4 Relación del **ACT⁻¹** con el proceso de oxidación de hollín. Extensión a diferentes puntos de operación.

Con el objetivo de proporcionar un mayor conocimiento y, a su vez, obtener una visión general del proceso de oxidación del hollín, se procede a realizar el análisis anterior, extendido a varios puntos de funcionamiento del mapa motor, ya mencionados en la Tabla 4.1 y en la Tabla 4.2. Para ello, el análisis se divide en dos grupos según el grado de carga que presentaban los puntos de funcionamiento ensayados.

En un primer grupo se analizarán los puntos de funcionamiento de 2000rpm y 2bar BMEP, 2000rpm y 5bar BMEP, 1500rpm y 8bar BMEP, y 1500rpm y 14bar BMEP. Para estas condiciones ha sido posible ensayar las variaciones de Swirl, de CA50 y de tasa de EGR.

En el segundo grupo se analizan conjuntamente las condiciones de 2000rpm y 2bar BMEP, y 2000rpm y 5bar BMEP, en las que han sido ensayadas las variaciones de presión de inyección, de densidad ambiente dentro de la cámara de combustión y la temperatura de admisión.

4.4.1. Variación de SN, CA50 y EGR

En la Figura 4.17 se muestra el valor promedio del tiempo de vida media de KL frente al valor promedio del tiempo de vida media del **ACT⁻¹** a 2000rpm y 2bar de BMEP. En este caso se representan en conjunto las variaciones del Swirl, EGR y CA50. Para cada condición ensayada, los valores de R^2 obtenidos tras ajustar exponencialmente ambos parámetros han sido mostrados en la sección anterior, en las Tablas 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6. El punto de funcionamiento con $SN = 1.4$, $EGR = 0\%$ y $CA50 = 13 \text{ CAD dPMS}$ coincide en las tres variaciones. En consecuencia, se puede comprobar la solidez de la metodología.

De esta forma, el proceso de mezcla se ve alargado en el tiempo, refiriéndose a un aumento del parámetro $t_{1/2 \text{ ACT}^{-1}}$, debido a la disminución de SN y/o el incremento de EGR y/o el retraso de CA50, el proceso de oxidación del hollín es peor y por lo tanto el $t_{1/2 \text{ KL}}$ también es mayor. Tratando de evaluar el $t_{1/2 \text{ ACT}^{-1}}$ como

un parámetro que se correlacione con el proceso de oxidación del hollín, se ha realizado un ajuste lineal aplicado a los 11 puntos de operación, obteniendo una precisión razonable.

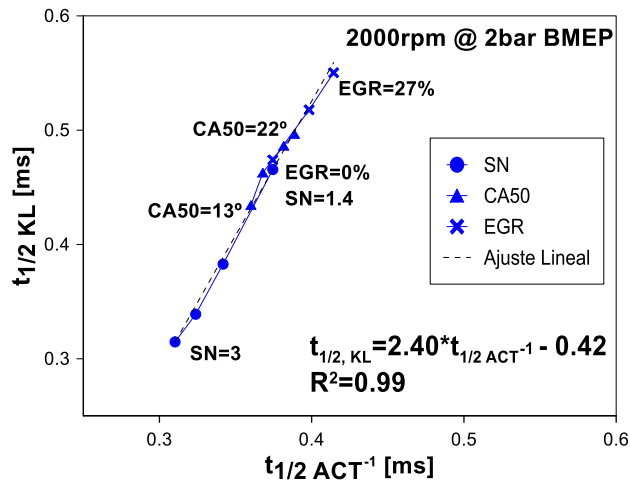


Figura 4.17. Correlación entre los tiempos de vida media del KL y del ACT^{-1} en el punto 2000@2 para las diferentes variaciones de SN, EGR y CA50.

La Figura 4.18 representa el valor promedio del tiempo de vida media de KL frente al valor promedio del tiempo de vida media del ACT^{-1} a 2000rpm y 5bar de BMEP. De igual manera que en el caso anterior, se presentan conjuntamente las diferentes variaciones ensayadas. Para estas condiciones del motor ensayadas, los valores de R^2 obtenidos tras realizar los ajustes exponenciales se recogen en la Tabla 4.10, observándose una precisión suficientemente buena. Siguiendo la misma metodología que para el punto de funcionamiento 2000rpm y 2bar BMEP, el punto ensayado con SN = 1.4, EGR = 0% and CA50 = 13 CAD dPMS se repite en las variaciones de las tres variables. A su vez, las tendencias obtenidas de ambos parámetros son similares al punto de 2 bar BMEP. En general, una mayor duración del proceso de mezcla debido al empeoramiento de las condiciones dentro del cilindro (baja densidad, baja proporción de oxígeno y baja turbulencia) se correlaciona con un proceso de oxidación del hollín más pobre. Con el objetivo de cuantificar esta relación, se ha aplicado un ajuste lineal, de nuevo a las once condiciones de operación ensayadas, obteniendo una precisión razonable.

2000rpm @ 5bar - KL					
SN [-]	Valores R^2 [-]	CA50 [°]	Valores R^2 [-]	EGR [%]	Valores R^2 [-]
1.4	0.9828	6	0.9582	0	0.9828
2	0.8904	11	0.9788	11	0.9567
2.5	0.8859	16	0.9382	22	0.9247
3	0.8140	20	0.9719	-	-

2000rpm @ 5bar - ACT^{-1}					
SN [-]	Valores R^2 [-]	CA50[°]	Valores R^2 [-]	EGR [%]	Valores R^2 [-]
1.4	0.9892	6	0.9561	0	0.9957
2	0.9819	11	0.9996	11	0.9910
2.5	0.9930	16	0.9246	22	0.9003
3	0.9904	20	0.9883	-	-

Tabla 4.10. Valores de R^2 de los ajustes de KL y ACT^{-1} para las variaciones de SN, EGR y CA50 en el punto de 2000rpm@5bar BMEP.

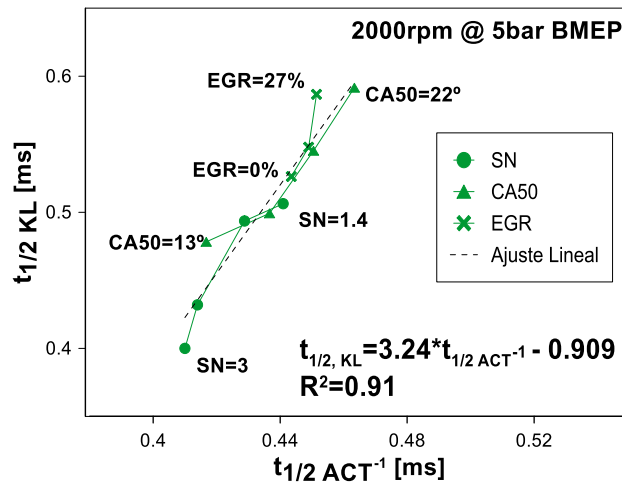


Figura 4.18. Correlación entre los tiempos de vida media del KL y del ACT^{-1} en el punto 2000@5 para las diferentes variaciones de SN, EGR y CA50.

En la Figura 4.19 se muestra el valor promedio del tiempo de vida media de KL frente al valor promedio del tiempo de vida media del ACT^{-1} a 1500rpm y 8bar de BMEP. De igual manera que en el caso anterior, se presentan conjuntamente las diferentes variaciones ensayadas. Para estas condiciones del motor ensayadas, los valores de R^2 obtenidos tras realizar los ajustes exponenciales se recogen en la Tabla 4.11, observándose una precisión aceptable. De igual manera que para los casos anteriores, el punto ensayado con SN = 1.4, EGR = 0% and CA50 = 13 CAD dPMS se repite en las variaciones de los tres parámetros motorísticos. Ambas tendencias obtenidas de los tiempos de vida media son similares en comparación a las condiciones de baja carga mostradas y analizadas anteriormente. Es destacable que al aumentar la carga, los tiempos de mezcla aumentan en comparación a las condiciones de baja carga. En este sentido, la cantidad de hollín obtenida en las medi-

4.4. Relación del **ACT-1** con el proceso de oxidación de hollín. Extensión a diferentes puntos de operación. 61

ciones fue mayor, y por lo tanto, el $t_{1/2\text{ KL}}$ también lo es. Para cuantificar la relación entre ambos tiempos de vida media, igual que en los análisis anteriores, ha sido aplicado un ajuste lineal entre ambos parámetros.

1500rpm @ 8bar - KL					
SN [-]	Valores R^2 [-]	CA50 [°]	Valores R^2 [-]	EGR [%]	Valores R^2 [-]
1.4	0.9962	6	0.9442	0	0.9904
2	0.9464	11	0.9318	11	0.9866
2.5	0.9718	16	0.9832	22	0.9865
3	0.9601	20	0.9790	-	-

1500rpm @ 8bar - ACT^{-1}					
SN [-]	Valores R^2 [-]	CA50[°]	Valores R^2 [-]	EGR [%]	Valores R^2 [-]
1.4	0.9747	6	0.9366	0	0.9691
2	0.9768	11	0.9694	11	0.9696
2.5	0.9823	16	0.9720	22	0.9311
3	0.9903	20	0.9422	-	-

Tabla 4.11. Valores de R^2 de los ajustes de KL y ACT^{-1} para las variaciones de SN, EGR y CA50 en el punto de 1500rpm@8bar BMEP.

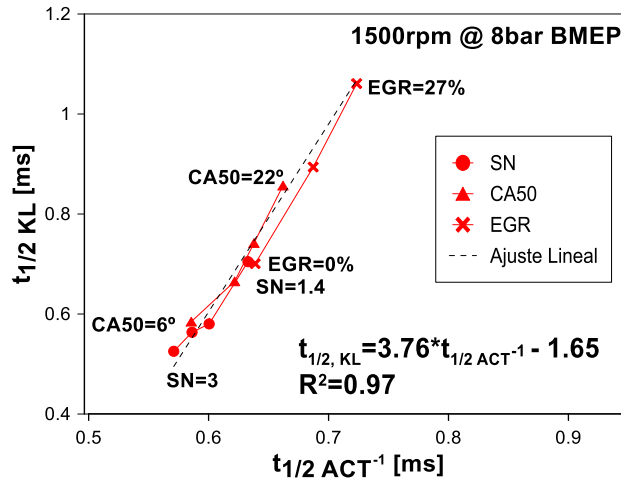


Figura 4.19. Correlación entre los tiempos de vida media del KL y del ACT^{-1} en el punto 1500@8 para las diferentes variaciones de SN, EGR y CA50.

La Figura 4.20 representa el valor promedio del tiempo de vida media de KL frente al valor promedio del tiempo de vida media del ACT^{-1} a 1500rpm y 14bar de BMEP. Se grafican conjuntamente los valores de las variaciones de CA50 y SN. Se puede notar que en esta condición de operación no se realizó el análisis de la variación de EGR debido al límite máximo de FSN=3 que se alcanzó realizando el ensayo sin EGR. La Tabla 4.12 muestra los valores de R^2 de los ajustes de ambos tiempos de vida media. El punto ensayado con SN = 1.4, EGR = 0% and CA50 = 13 CAD dPMS se repite en las variaciones de los dos parámetros motorísticos en este punto de media/alta carga. De igual forma que en los casos previos, un ajuste

4.4. Relación del **ACT-1** con el proceso de oxidación de hollín. Extensión a diferentes puntos de operación. 62

lineal ha sido realizado con el fin de evaluar la relación entre ambos tiempos de vida media, obteniendo una correlación aceptable.

1500rpm @ 14bar - KL			
SN [-]	Valores R^2 [-]	CA50 [°]	Valores R^2 [-]
1.4	0.9821	11	0.9206
2	0.9844	14	0.9817
2.5	0.9875	17	0.9056
3	0.9861	-	-
1500rpm @ 14bar - ACT^{-1}			
SN [-]	Valores R^2 [-]	CA50[°]	Valores R^2 [-]
1.4	0.9573	11	0.9957
2	0.9832	14	0.9974
2.5	0.8572	17	0.9875
3	0.9537	-	-

Tabla 4.12. Valores de R^2 de los ajustes de KL y ACT^{-1} para las variaciones de SN y CA50 en el punto de 1500rpm@14bar BMEP.

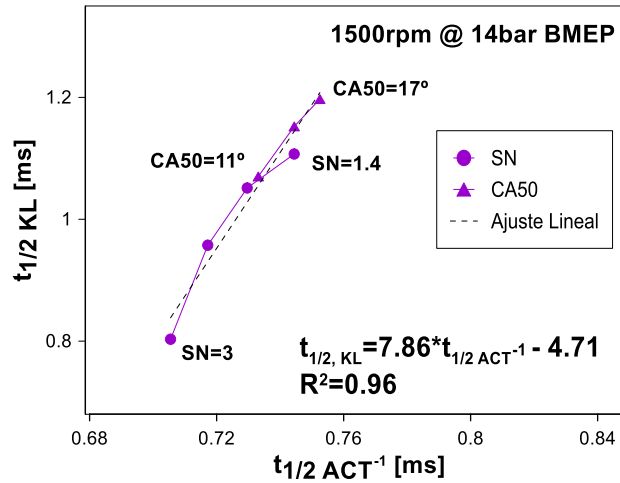


Figura 4.20. Correlación entre los tiempos de vida media del KL y del ACT^{-1} en el punto 1500@14 para las diferentes variaciones de SN, EGR y CA50.

Tras este análisis conjunto de los diferentes puntos de funcionamiento del motor, se pretende proporcionar un enfoque más general tras considerar la razonable relación lineal entre los parámetros $t_{1/2 KL}$ y $t_{1/2 ACT^{-1}}$ en cada uno de las condiciones de operación del motor. Por consiguiente, ambos parámetros pueden ser relacionados mediante la siguiente ecuación, independientemente de la carga:

$$t_{1/2 KL} = A \cdot t_{1/2 ACT^{-1}} - B \quad (17)$$

La Figura 4.21 representa el tiempo de vida media experimental del parámetro KL frente al tiempo de vida media simulado por la expresión anterior. Los coeficientes A y B se ajustaron para todas las condiciones de funcionamiento del motor

en conjunto. Resulta interesante destacar, que para determinar la capacidad de mezcla tan solo es necesario hallar la tasa de liberación de calor y la tasa de inyección, los cuales son parámetros sencillos de obtener en motores reales de producción.

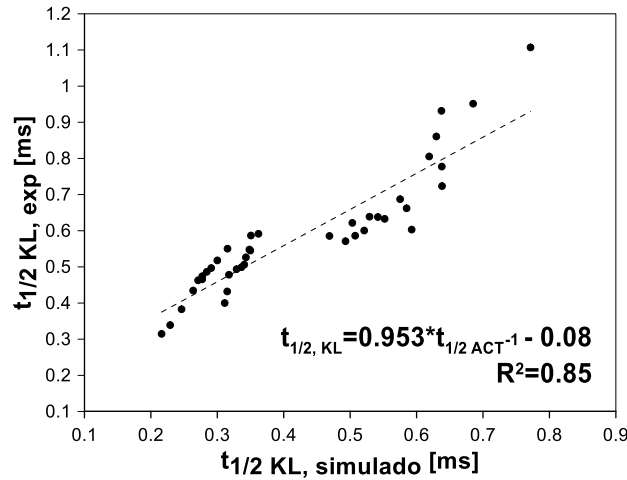


Figura 4.21. Correlación entre los tiempos de vida media de KL experimental y de KL simulado para todos los puntos de operación ensayados con variaciones de SN, EGR y CA50.

La oxidación del hollín se trata de un fenómeno muy complejo, y la anterior correlación, a pesar de tener una precisión aceptable, está claro que deja entrever que existen más factores, además del proceso de mezcla, que influyen en él. Con el objetivo de obtener una correlación más sólida entre ambos factores analizados, y así afianzar la estrecha relación entre la capacidad de mezcla y el proceso de oxidación del hollín, a continuación se analiza en conjunto la variación de presión de inyección, densidad y temperatura de admisión, solamente en condiciones de funcionamiento de baja carga.

4.4.2. Variación de P_{iny} , φ_{PMS} y T_{adm}

El valor promedio del tiempo de vida media de KL frente al valor promedio del tiempo de vida media del ACT^{-1} a 2000rpm y 2bar de BMEP se representa en la Figura 4.22. Han sido graficados conjuntamente los valores de las variaciones de presión de inyección, densidad y temperatura de admisión. Para estas condiciones del motor, los valores de R^2 obtenidos tras la realización de los ajustes exponenciales de ambos parámetros ya han sido previamente mostrados en las Tablas 7, 8 y 9, obteniendo una precisión de los ajustes adecuada. De esta manera se puede comprobar la solidez del método. Por lo tanto, cuando el proceso de mezcla se inhibe debido a la disminución de la presión de inyección, la densidad del aire y/o la temperatura del aire admitido, la oxidación del hollín es más pobre y por lo tanto el parámetro $t_{1/2 KL}$ aumenta. Para tratar de evaluar el $t_{1/2 ACT^{-1}}$ como un parámetro que se correlacione con el proceso de oxidación del hollín, se ha aplicado un ajuste lineal comparando conjuntamente las 10 condiciones de operación del motor, obteniéndose una relación razonable.

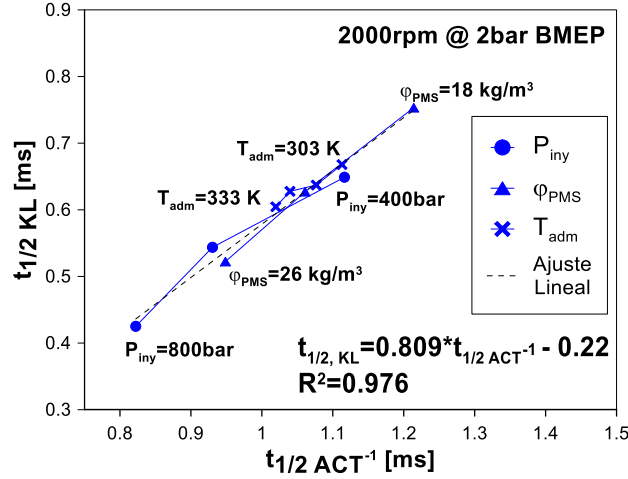


Figura 4.22. Correlación entre los tiempos de vida media del KL y del ACT^{-1} en el punto 2000@2 para las diferentes variaciones de P_{iny} , φ_{PMS} y T_{adm} .

La Figura 4.23 muestra el valor promedio de los tiempos de vida media de KL frente a los tiempos de vida media de ACT^{-1} en el punto de funcionamiento 2000rpm y 5bar de BMEP. De igual forma que en el caso anterior, son graficados los resultados de las diferentes variaciones. Para estas condiciones de funcionamiento, los valores de R^2 se presentan en la Tabla 4.13. Se ha aplicado la misma metodología que en el resto de casos ensayados y previamente analizados. Las tendencias de ambos tiempos de vida media son similares a las del punto 2 bar de BMEP. En general, la inhibición del proceso de mezcla producida por la reducción de la presión de inyección y/o la deterioración de las condiciones dentro del cilindro (baja densidad y baja temperatura del aire admitido) se correlaciona con una oxidación del hollín más pobre. Con el objetivo de cuantificar esta relación, se ha aplicado un ajuste lineal para los diez puntos de funcionamiento del motor, obteniendo una precisión suficientemente buena.

2000rpm @ 5bar - KL					
P_{iny} [bar]	Valores R^2 [-]	φ_{PMS} [kg/m ³]	Valores R^2 [-]	T_{adm} [K]	Valores R^2 [-]
400	0.9751	19	0.9752	303	0.9576
600	0.9916	24	0.9818	313	0.9762
800	0.9832	28	0.9774	323	0.9410
-	-	-	-	333	0.9649
2000rpm @ 5bar - ACT^{-1}					
P_{iny} [bar]	Valores R^2 [-]	φ_{PMS} [kg/m ³]	Valores R^2 [-]	T_{adm} [K]	Valores R^2 [-]
400	0.9912	19	0.9458	303	0.9584
600	0.9819	24	0.9672	313	0.9658
800	0.9739	28	0.9800	323	0.9811
-	-	-	-	333	0.9693

Tabla 4.13. Valores de R^2 de los ajustes de KL y ACT^{-1} para las variaciones de P_{iny} , φ_{PMS} y T_{adm} en el punto de 2000rpm@5bar BMEP.

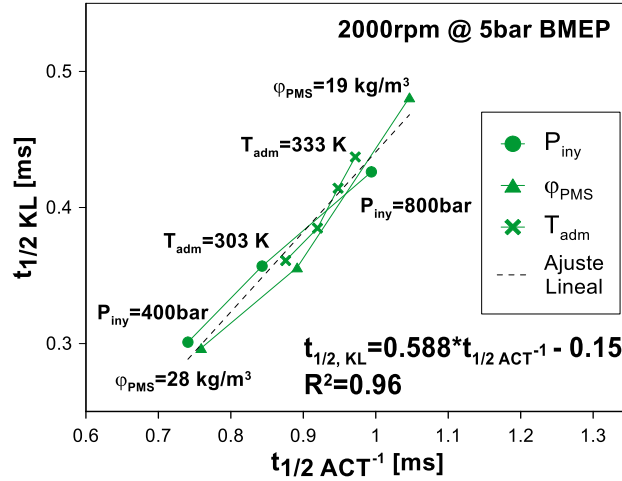


Figura 4.23. Correlación entre los tiempos de vida media del KL y del ACT^{-1} en el punto 2000@5 para las diferentes variaciones de P_{iny} , φ_{PMS} y T_{adm} .

De igual forma que en el caso del análisis de las variaciones de SN, EGR y CA50, el objetivo de esta subsección sigue siendo obtener una visión más general del proceso de oxidación del hollín en relación a la razonable correlación entre ambos tiempos de vida media, KL y ACT^{-1} . Por lo tanto, estos parámetros también podemos relacionarlos del siguiente modo:

$$t_{1/2 KL} = C \cdot t_{1/2 ACT^{-1}} - D \quad (18)$$

Cabe destacar que esta correlación tiene el objetivo de ser más sólida, y obtener resultados más precisos, que el realizado en la anterior subsección, puesto que los ensayos se han centrado en condiciones de funcionamiento del motor a baja carga con el fin de focalizar el análisis.

La Figura 4.24 representa el tiempo de vida media de KL medido de forma experimental frente al tiempo de vida media simulado con la ecuación (18). Donde los coeficientes C y D fueron ajustados para las dos condiciones de operación ensayadas a baja carga. La diferencia entre el tiempo de vida media experimental y el simulado se encuentra dentro de unos límites aceptables. Una posible explicación para estas diferencias es que la oxidación del hollín es un proceso extremadamente complejo y no se rige únicamente por el proceso de mezcla.

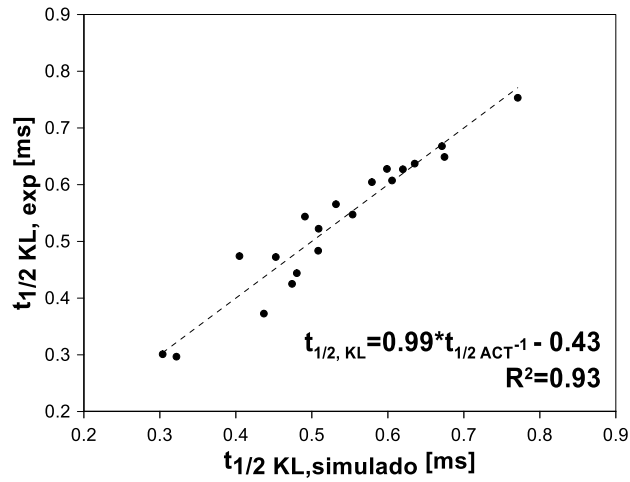


Figura 4.24. Correlación entre los tiempos de vida media de KL experimental y de KL simulado para todos los puntos de operación ensayados con variaciones de P_{iny} , φ_{PMS} y T_{adm} .

La oxidación del hollín consiste en un problema muy complejo que implica más procesos además del proceso de mezcla. No obstante, este trabajo confirma la importancia de la capacidad de mezcla en el proceso de oxidación del hollín. La investigación futura debe considerar también la temperatura del hollín, entre otros parámetros, para explicar este proceso con mayor precisión.

5. Conclusiones

El principal objetivo del presente proyecto era obtener una mayor percepción en el proceso de oxidación del hollín. Para ello se ha empleado un motor en producción policilíndrico de 1.9L de cilindrada. En concreto, han sido empleados dos parámetros para la realización del estudio. Por un lado, el proceso de oxidación del hollín se ha caracterizado con el tiempo de vida media tras la realización de un ajuste exponencial de la señal recogida de fracción volumétrica de hollín. El KL fue obtenido aplicando el método de dos colores, con la ayuda de una sonda optoelectrónica. Por otro lado, se evaluó la capacidad de mezcla mediante el cálculo del parámetro ACT^{-1} . También ha sido aplicado el ajuste exponencial a la evolución temporal de este parámetro, que fue obtenido mediante la simulación de tasas de inyección y medidas experimentales de liberación de calor.

5.1 Conclusiones

Se pueden extraer las siguientes conclusiones del trabajo realizado:

- Se ha empleado una metodología sólida derivada de [15], para determinar los tiempos de vida media, asociados a los decrecimientos exponenciales de la última etapa del ciclo de combustión. Éstos han servido como trazadores, tanto de la tasa de oxidación del hollín, como de la tasa de mezcla dentro del cilindro.
- El tiempo de vida media del parámetro ACT^{-1} aumenta, y por lo tanto la capacidad de mezcla se ve empeorada, con una disminución del Swirl y/o un aumento de la tasa de EGR y/o un retraso del CA50 y/o una disminución de la presión de inyección y/o un empeoramiento de las condiciones dentro del cilindro (baja densidad y/o baja temperatura del aire admitido).
- En el caso del Swirl, cuando éste se reduce, también lo hace el flujo rotacional del cilindro y en consecuencia decrece la turbulencia generada, siendo ésta un factor de influencia directa en la capacidad de mezcla. En cuanto al EGR, si aumenta éste parámetro, la disponibilidad de oxígeno se reduce y disminuye la temperatura dentro del cilindro, lo que conlleva a un impacto negativo en la capacidad de mezcla. Para el parámetro CA50, cuando éste se retrasa, el proceso de combustión tiene lugar durante la carrera de expansión (como es el caso del SoI empleado en este proyecto). Esto implica que las condiciones dentro del cilindro empeoran, perjudicando también el proceso de mezcla. Para el caso de la variación de presión de inyección, ante una disminución de ésta, disminuye el momento del chorro, englobando menos aire. En cuanto a la disminución de densidad y temperatura de admisión, ambos parámetros producen unas

condiciones más pobres que inhiben el proceso de mezcla, empeorando a su vez la combustión.

- El tiempo de vida media del parámetro KL, trazador de la tasa de oxidación del hollín, presenta grandes similitudes con el tiempo de vida media de ACT^{-1} , trazador de mezcla.
- Se ha deducido un modelo 0-D basado en los medidas experimentales para estimar el proceso de oxidación del hollín a partir de la obtención del parámetro de ACT^{-1} , trazador de la mezcla. Donde el ACT^{-1} se obtiene mediante la tasa de liberación de calor y la tasa de inyección, ambos parámetros sencillos de obtener en motores reales de producción. Por lo tanto, la ventaja que presenta este modelo es la fácil estimación del proceso de oxidación del hollín en motores donde el acceso óptico es reducido y en muchos casos nulo.

5.2 Estudios futuros

Tras la síntesis de las conclusiones obtenidas, es destacable plantear cómo continuar la presente investigación. Para ello, por un lado, se proporcionan directrices acerca de cómo completar y mejorar el trabajo, y por otro lado, se indica cómo implementar los beneficios del conocimiento adquirido en las estrategias de combustión.

En primer lugar, para profundizar en el estudio, sería conveniente que la evolución tanto del parámetro trazado de mezcla, ACT^{-1} , como el de la fracción volumétrica de hollín, KL, fuese dependiente del espacio y no solamente del tiempo como ha sido el caso del presente estudio, puesto que es sabido que éstos parámetros sufren fuertes gradientes espaciales. Para ello se propone ampliar el estudio realizando en un motor con un acceso óptico mayor, que permita la adquisición de imagen de la llama y la radiación de ésta con cámaras CCD. El inconveniente que presenta la aplicación de esta técnica óptica es que las modificaciones que sufre el motor pueden influir en los datos finalmente recogidos y diferir levemente de los reales que se obtendrían de un motor de producción, como es el del estudio.

Otra certeza que se puede extraer es que el proceso de oxidación del hollín se trata de un proceso muy complejo, que por lo tanto, comprende muchos más aspectos además de la capacidad de mezcla. En consecuencia, para lograr hallar un modelo que prevea en su totalidad el proceso de oxidación, debería estudiarse su dependencia de otros indicadores, como puede ser la temperatura alcanzada en el cilindro durante el proceso de combustión. De esta manera sería interesante comprobar si el ajuste mejora añadiendo a la correlación un parámetro más. Cabría esperar una mejora en el ajuste entorno a un 15% y un 7%.

Por último, resaltar que el beneficio directo que se extrae de esta investigación es, por un lado, la obtención de una combinación de parámetros motorísticos que conjuntamente conduzcan a una disminución de la concentración de hollín en las emisiones de un motor de encendido por compresión, y por otro lado, la validación de la sonda optoelectrónica VisioFem, herramienta que precisa de un acceso óptico muy reducido, es decir, de muy leves modificaciones del motor para poder realizar la toma de datos. Ambas ventajas de gran interés para los fabricantes de vehículos.

6. Bibliografía

- [1] Dirección General de Tráfico, «www.dgt.es,» [En línea].
- [2] Prof. F. Payri, Prof. J. M. Desantes, Motores de combustión interna alternativos, Valencia: Reverté, 2013.
- [3] José María García Oliver, «Aportaciones al Estudio del Proceso de Combustión Turbulenta de Chorro en Motores Diesel de Inyección Directa,» *Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos.*, 2004.
- [4] García, Antonio, «Estudio de los efectos de la post inyección sobre el proceso de combustión y la formación de hollín en motores Diesel,» *Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos.*, 2006.
- [5] Dec, J. E., «A Conceptual Model of DI Diesel Combustion Based on Laser-Sheet Imaging,» *Transactions of the SAE*, vol. 106, pp. 1319-1348, 1997.
- [6] Flynn, P., Durrett, R., Hunter, G., Loye, A., Akinyemi, O., Dec, J., y otros, «Diesel Combustion: An Integrated View Combining Laser Diagnostics, Chemical Kinetics and Empirical Validation,» *SAE Paper*, 1999.
- [7] Benajes, J., Martín, J., García, A., Villalta, D. , «An Investigation of Radiation Heat Transfer in a Light-Duty Diesel Engine,» *SAE Int. J. Engines*, 2015.
- [8] Benajes, J., Martín, J., García, A., Villalta, D. , «In-cylinder soot radiation heat transfer in direct-injection diesel engines,» *Energy Conversion and Management*, 2015.
- [9] Monin, Christelle, «Caracterización del Proceso de Formación de Hollín en una Llama de Difusión Diesel de Baja Temperatura,» *Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos.*, 2009.
- [10] Heywood, J.B., «Internal Combustion Engine Fundamentals,» *McGraw-Hill Book Co*, 1988.
- [11] Xiaobei, C., Hongling, J., and Zhaowen, W., «A Numerical Modeling and Experimental Study on Soot Formation for a Direct Injection Diesel Engine,» *SAE Technical Paper*, 2008.
- [12] Lequien, G., Andersson, Ö., Tunestal, P., and Lewander, M., «A Correlation Analysis of the Roles of Soot Formation and Oxidation in a Heavy-Duty Diesel Engine,» *SAE Technical Paper*, 2013.

- [13] Dembinski, H. and Angstrom, H., «Swirl and Injection Pressure Impact on After-Oxidation in Diesel Combustion, Examined with Simultaneous Combustion Image Velocimetry and Two Colour Optical Method,» *SAE Technical Paper*, 2013.
- [14] Pickett L.M., Siebers D.L. , «Soot in diesel fuel jets: effects of ambient temperature, ambient density, and injection pressure.,» *Combustion and Flame*, 2004.
- [15] Gallo, Y., Simonsson, J., Lind, T., Bengtsson, P., «A Study of In-Cylinder Soot Oxidation by Laser Extinction Measurements During an EGR-Sweep in an Optical Diesel Engine,» *SAE*, 2015.
- [16] Huestis, E., Erickson, P., and Musculus, M., «In-Cylinder and Exhaust Soot in Low-Temperature Combustion Using a Wide-Range of EGR in a Heavy-Duty Diesel Engine,» *SAE*, 2007.
- [17] Payri, F., Olmeda, P., Martin, J., and Carreño, R., «A New Tool to Perform Global Energy Balances in DI Diesel Engines,» *SAE Int. J. Engines*, 2014.
- [18] «DRIVEN Stand Alone Direct Injector Driver System User's Manual,» INC. Network Blvd, San Antonio, Texas, October 2010.
- [19] Hottel H. C. y Broughton F. P., «Determination of true temperature and total radiation from luminous gas flames,» *Ind. and Eng. Chem.*, vol. 4, pp. 166-175, 1932.
- [20] Zhao H. y Ladommatos N., «Engine combustion instrumentation and diagnostics,» *Society of Automotive Engineers*, 2001.
- [21] Svensson, K., Mackrory, A., Richards, M., and Tree, D., «Calibration of an RGB, CCD Camera and Interpretation of its Two-Color Images for KL and Temperature,» *SAE Technical*, 2005.
- [22] Payri F., Pastor J.V., Garcia J.M., Pastor J.M., «Contribution to the application of two-colour imaging to diesel combustion,» *Meas. Sci. Technol.*, 2007.
- [23] Musculus M.P.B., Singh S., Reitz R.D., «Gradient effects on two-color soot optical pyrometry in a heavy-duty DI diesel engine,» *Combustion and Flame*, pp. 216-227, 2008.
- [24] Lapuerta, M., Armas, O., & Hernández, J., «Diagnosis of DI Diesel combustion from in-cylinder pressure signal by estimation of mean thermodynamic properties of the gas,» *Applied thermal Engineering*, vol. 19, pp. 513-529, 1999.
- [25] Dembinski, H. and Angstrom, H., «Swirl and Injection Pressure Impact on After-Oxidation in Diesel Combustion, Examined wiith Simultaneous Combustion Image Velocimetry and Two Colour Optical Method,» *SAE*, 2013.

- [26] Musculus, M., «Measurements of the Influence of Soot Radiation on In-Cylinder Temperatures and Exhaust NO_x in a Heavy-Duty DI Diesel Engine,» *SAE*, 2005.
- [27] Lequien, G., Anderson, Ö., Tunestal, P., and Lewander, M., «A Correlation Analysis of the Roles of Soot Formation and Oxidation in a Heavy-Duty Diesel Engine,» *SAE*, 2013.
- [28] Arrègle J., Pastor J.V., López J.J., García A., Insights on post-injection associated soot emissions in direct injection diesel engines. *Combustion and Flame*, Valencia, 2008.

DOCUMENTO II

PLIEGO DE CONDICIONES

1. Introducción

1.1 Definición y alcance del pliego

El documento que a continuación se presenta, denominado “Pliego de Condiciones”, es de gran importancia en la fase de ejecución del proyecto. En él se detallan las condiciones generales, técnicas, de seguridad e higiene y ejecución a cumplir sin excepción.

El objetivo principal del presente pliego es poner a disposición toda la normativa necesaria para garantizar tanto la seguridad de todo el personal involucrado en la realización del mismo así como el éxito de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales.

En él quedan excluidos, sin embargo, todos los trabajos de obra civil, instalación de agua, electricidad, aire comprimido... así como el resto de elementos constructivos de la sala donde va a estar ubicada la instalación experimental. Éstos deberán ser objeto de especificación aparte y responsabilidad de la empresa constructora.

1.2 Condiciones legales

El presente proyecto es de carácter confidencial, por lo que el acceso al mismo no otorga al usuario el derecho de alteración, modificación, explotación, reproducción, distribución o comunicación pública de cualquier contenido presente.

2. Condiciones generales

En este apartado se especifican las condiciones generales de salud e higiene requeridas en el puesto de trabajo, no teniendo sentido en el ámbito del presente proyecto las especificaciones de carácter económico y legal.

2.1 Condiciones generales de seguridad y salud del puesto de trabajo

La gran cantidad de información experimental obtenida durante la realización del proyecto y su posterior análisis en equipos informáticos, requiere de muchas horas de tratamiento por parte del trabajador. Por ello, las condiciones en las cuales se desarrolle el trabajo van a influir tanto en la salud como en el rendimiento de las personas involucradas.

Así, es de suma importancia poner los medios oportunos para la prevención de riesgos laborales que puedan darse por motivo de fatiga, estrés, cansancio visual, etc.

La normativa que se ajusta al tipo de trabajo que se va a realizar está recogida en el Real Decreto 488/1997, del 14 de Abril, sobre disposiciones mínimas de segu-

ridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización. Para ser precisos en su definición de Puesto de Trabajo con PVD's es el "constituido por un equipo con pantalla de visualización provisto, en su caso, de un teclado, o dispositivo de adquisición de datos, de un programa para la interconexión persona-máquina, de accesorios ofimáticos y de un asiento y mesa o superficie de trabajo, así como el entorno laboral inmediato". Este es caso presentado en el proyecto.

Como se ha comentado, los entornos donde se lleva a cabo la actividad deben atenerse a lo establecido en el Real Decreto 486/1997 del 14 de Abril, sobre condiciones mínimas de trabajo, además de lo establecido específicamente para puestos de trabajo con PVD's en el R.D 488/1997 ya reseñado. Estas condiciones se pueden agrupar en:

2.1.1. Medidas de emergencia. Vías y salidas de evacuación.

La empresa debe haber adoptado medidas de emergencia en la que se prevean las vías y salidas de evacuación en caso de declararse la emergencia. Estas medidas deben darse a conocer a los trabajadores. Existen numerosas normativas en este aspecto. La mayoría de estas normativas están enfocadas a la fase constructiva de la instalación. En este pliego se presupone que estas medidas han sido debidamente validadas en la construcción de la instalación, teniendo en cuenta su orientación experimental y las características que esta impone.

2.1.2. Instalación eléctrica

La instalación eléctrica deberá estar proyectada, puesta en funcionamiento y controlada (mantenimiento) por una empresa debidamente autorizada por el Ministerio de Industria y Energía o la Consejería de Industria o similar de la Comunidad Autónoma donde esté emplazado el lugar de trabajo. Esta instalación debe prever que, dado el uso que va a hacerse de la energía eléctrica, no pueda originar contactos en las personas, incendios y/o explosiones, ateniéndose para ello a lo establecido sobre tensiones de seguridad en los conductores, sistemas de protección, etc., en los Reglamentos de Baja y Alta Tensión en vigor. Desde la perspectiva de la seguridad eléctrica, lo establecido para puestos de trabajo equipados con PVD's es lo siguiente:

- Cumplir los requerimientos de la directiva sobre emisiones electromagnéticas, que exige que toda radiación electromagnética deberá reducirse a niveles insignificantes, desde el punto de vista de la protección, seguridad y salud de los trabajadores.
- Garantizar el adecuado mantenimiento de los cables y las conexiones.
- Mantener separados los cables eléctricos de los telefónicos.
- Emplear longitudes de cable suficientes como para permitir futuros cambios, y al tiempo disponerlos de tal modo que su mantenimiento sea el

correcto, es decir, fuera de superficies donde puedan ser pisados o sometidos a condiciones adversas.

- Facilitar el acceso y mantenimiento de los cables sin interrupción de las actividades del trabajo.

2.1.3. Condiciones termohigrométricas

La situación de bienestar o confort térmico es distinta para cada persona, si bien depende de factores como:

- Temperatura, humedad y velocidad del aire.
- Temperatura de paredes, suelos y objetos.
- La actividad a desarrollar.
- La vestimenta.

El Real Decreto 488/1997 sobre puestos de trabajo con PVD's establece estas magnitudes para dichos puestos de trabajo:

- La temperatura operativa de confort debe mantenerse dentro del siguiente rango: en época de verano de 23 a 26°C, en época de invierno de 20 a 24°C y en todo tiempo no exceder de 26°C.
- En cuanto a la sequedad de ojos y mucosas, se puede prevenir manteniendo la humedad relativa del aire entre el 45 y 65%, para cualquier temperatura.

2.1.4. Iluminación

La iluminación puede ser natural o artificial, siendo más recomendable la primera de ellas. Debido a la variación de su intensidad durante la jornada laboral se debe complementar con iluminación artificial, la cual suele ser general complementándose con zonas de iluminación localizada.

En ambos tipos de iluminaciones hay que tener en cuenta que no se debe producir deslumbramientos ni un excesivo contraste entre zonas iluminadas y de sombra, tal y como establece la normativa específica para estos puestos de trabajo. Debe existir una iluminación general en donde se ubiquen los puestos de trabajo con PVD's. En caso de utilizar una fuente de iluminación individual complementaria, ésta no debe ser usada en las cercanías de la pantalla si produce deslumbramiento directo o reflexiones.

Los niveles de iluminación serán suficientes para las tareas que se realicen en el puesto, pero no deben alcanzar valores que reduzcan el contraste de la pantalla por debajo de lo tolerable. Para evitar deslumbramientos por reflejos, las superficies del mobiliario y de los elementos de trabajo deben ser de aspecto mate.

Respecto a la ubicación del puesto y de la pantalla, la norma da indicaciones sobre colocación más adecuada del puesto de trabajo para evitar reflejos y deslumbramientos. Al respecto, se recomienda que la pantalla se coloque paralelamente a las ventanas, y nunca frente a ellas o de espaldas a ellas debido a que en uno y otro

caso originarían reflejos y deslumbramientos, bien directos o por reflexión en el usuario. Estas medidas pueden ser complementadas mediante la utilización de cortinas o persianas que amortigüen la luz, o mediante mamparas en los locales que dispongan de ventanas en más de una pared.

2.1.5. Ergonomía

Los riesgos presentados con anterioridad precisan de unas medidas que están establecidas en el Real Decreto 488/1997, de 14 de Abril. El diseño del puesto de trabajo está directamente relacionado con los problemas posturales. Si se tiene en cuenta que el trabajo con PVD's se caracteriza por posturas estáticas prolongadas, se puede deducir que los efectos de estas posturas se agravan cuando no se ponen las medidas adecuadas mediante un diseño correcto del puesto de trabajo.

Este diseño debe adecuarse a las condiciones anatómicas y fisiológicas de las personas, con las dificultades que esto supone dada la gran multiplicidad de tipos de personas existentes, en cuanto a sus medidas antropométricas. Este problema se ha resuelto fabricando, dentro de unos estándares establecidos, un mobiliario que se adecua a los mismos. Además, el mobiliario y las superficies de trabajo deben carecer de esquinas y aristas agudas, el acabado debe tener aspecto mate, para evitar reflejos, y un tono preferiblemente neutro, y las superficies susceptibles de entrar en contacto con el usuario no deben ser buenas conductoras de calor, con el fin de evitar su transmisión a la piel del usuario.

- **Asiento:** La altura del asiento debe ser ajustable al rango necesario para la población de usuarios. El respaldo debe tener una suave prominencia para dar apoyo a la zona lumbar. Su altura e inclinación deben ser ajustables. La profundidad del asiento debe ser regulable. Todos los mecanismos de ajuste deben ser fácilmente manejables desde la posición sentada. Se recomienda la utilización de sillas dotadas de ruedas, aunque la resistencia de las ruedas al iniciar el movimiento debe evitar desplazamientos involuntarios en suelos lisos y con actividades de tecleo intensivos.
- **Mesa y espacio de trabajo:** La superficie de la mesa deberá ser poco reflectante, de dimensiones suficientes, y permitir una colocación flexible de la pantalla, del teclado, de los documentos y del material accesorio. El espacio deberá ser suficiente como para permitir a los trabajadores una posición cómoda. El puesto de trabajo deberá tener una dimensión suficiente como para permitir movimientos de trabajo y cambiar de postura. El soporte de los documentos deberá ser estable y regulable, y estar colocado de tal modo que se reduzcan al mínimo los movimientos incómodos de la cabeza y los ojos.
- **Postura de Referencia del Usuario:** Muslos horizontales y piernas verticales. Brazos verticales y antebrazos horizontales, formando ángulo recto desde el codo. Manos relajadas, sin extensión ni desviación lateral, guardando al máximo la recta del antebrazo para evitar el síndrome del

túnel carpiano, de ahí la recomendación de utilizar reposa manos, donde en realidad, reposan las muñecas. Columna vertebral recta. Planta del pie en ángulo recto con respecto a la pierna. Línea de visión paralela al plano horizontal. Línea de los hombros paralela al plano frontal, sin torsión del tronco. Ángulo de la línea de visión menor de 60° bajo la horizontal.

- **Colocación de la pantalla:** La distancia de la pantalla a los ojos del usuario no debe ser menor de 40 cm, y la distancia óptima, desde el punto de vista del confort visual, debe ser de 45 a 75 cm, La pantalla debe colocarse de manera que su área útil pueda ser vista bajo ángulos comprendidos entre la línea de visión horizontal y la trazada a 60° bajo la horizontal. En el plano horizontal la pantalla debe estar colocada dentro del ángulo de 120° del campo de visión del usuario, si bien es aconsejable situarla dentro de un ángulo de 70° .
- **La Pantalla:** La imagen de la pantalla deberá ser estable, sin fenómenos de destellos u otras formas de inestabilidad. El usuario de PVD's deberá poder ajustar fácilmente la luminosidad y/o el contraste entre los caracteres y el fondo de la pantalla, así como adaptarlos fácilmente a las condiciones del entorno. La pantalla debe ser orientable además de permitir ser inclinada con facilidad a voluntad de los usuarios. La pantalla no debe tener reflejos que puedan molestar al usuario.
- **El Teclado:** El teclado deberá ser inclinado e independiente de la pantalla, para permitir que el trabajador adopte una postura cómoda, que no provoque cansancio de brazos y manos. La altura de la tercera fila de teclas (fila central) no debe exceder de 30 mm con respecto a la base de apoyo del teclado, y la inclinación de este debe estar comprendida entre 0° y 25° con respecto a su horizontal. Si el diseño incluye soporte para las manos, su profundidad debe ser, al menos, de 10 cm. Si no existe dicho soporte se debe habilitar un espacio similar en la mesa de trabajo delante del borde frontal del teclado.
- **Equipos de Protección Individual:** Es recomendable el uso de protectores de pantallas, que son en realidad protectores de la vista del usuario, o de los usuarios, consistentes en un cristal sostenido por un marco que se superpone al cristal de la pantalla. Con este protector se supone que se está protegiendo la vista de los usuarios, además de dar prestaciones como claridad de contrastes y mayor luminosidad a la pantalla y sus contenidos.

2.1.6. Ruido

El Real Decreto 1316/1989 del 27 de Octubre establece que el empresario debe evaluar la exposición de los trabajadores al ruido con el objeto de determinar si se superan los límites establecidos en esta norma. Así, se deben aplicar las medidas

procedentes en el origen, en el medio y en el receptor, y los reconocimientos médicos específicos para las personas expuestas al ruido con la periodicidad y características que indica el Real Decreto. La fecha tope para hacer estas evaluaciones era la del 31 de marzo de 1990, no siendo obligatorio hacerlas en aquellos puestos de trabajo en los que el nivel diario equivalente o el nivel pico sean manifiestamente inferiores a los 80 dB(A) y 140 dB (B), respectivamente.

Normalmente, en los lugares donde se trabaja con PVD's no suelen existir altos niveles sonoros, pero en este entorno de trabajo existen niveles medios que pueden molestar y perturbar la atención de los operarios de equipos informáticos, incluso pueden resultar insoportables para actividades en las que se requiere una elevada concentración.

El nivel sonoro en los puestos de trabajo con PVD's debe ser tan bajo como sea posible. Para conseguirlo se deben utilizar equipos con una mínima emisión sonora, y optimizar la acústica del lugar de trabajo.

La Directiva establece que para tareas difíciles y complejas que requieran de especial concentración, como es el caso, el nivel sonoro continuo equivalente no debe exceder de 55 dB(A).

3. Condiciones particulares

Los ensayos experimentales son la base a partir de la cual se ha podido desarrollar y analizar el objeto del presente proyecto. Su realización entraña una serie de riesgos para los técnicos y personas presentes, con lo cual, tanto la estructura de la sala de ensayos, las instalaciones que contiene y los operarios que la controlan, han de cumplir con una serie de normas que se detallan a continuación.

De igual manera existen una serie de requisitos técnicos y de procedimiento dedicados centrados en el buen desarrollo de los ensayos con la finalidad de que los resultados obtenidos puedan ser considerados como correctos.

De acuerdo con esto, los aspectos que desarrollados a continuación son los siguientes:

- En primer lugar se plantearán las condiciones particulares que deben cumplir las salas de ensayos de modo que se garantice la correcta ejecución de los mismos sin poner en peligro la salud de las personas que sea necesario que estén en las proximidades del motor durante el desarrollo de los ensayos experimentales.
- En segundo lugar, se describirán brevemente los métodos con los que deberán ser tratados los distintos instrumentos de medida con la finalidad de asegurar la validez de los distintos resultados que aporten.

3.1 Condiciones de realización de los ensayos

Se entiende por ensayo del motor, el espacio de tiempo en que éste está funcionando y durante el cual se adquieren, a través de los sistemas de medida, datos

sobre las condiciones de operación, prestaciones y emisiones de contaminantes para su posterior tratamiento y estudio.

Antes y durante la realización de los ensayos deben observarse una serie de normas, que aseguren la validez de los ensayos, y la integridad de los equipos. La norma UNE-EN ISO 8178, “Motores alternativos de combustión interna. Medición de las emisiones de gases. Parte 1: Medición de gas y partículas en banco de ensayo”, es aplicable a los motores alternativos de combustión interna de uso móvil, transportable y estacionario, exceptuando los motores de vehículos concebidos originalmente para una utilización en la vía pública. Por lo tanto, no compete directamente a este proyecto. Sin embargo, comparte muchos principios con las mediciones de gases y partículas que han sido utilizadas durante mucho tiempo para los motores del tipo mencionado anteriormente.

Es por ello, que puede servir de guía en algunos aspectos como las condiciones de calibración de los sistemas de medida, el posterior cálculo de las emisiones, etc. Sí que hay que cumplir, de cara a una posible homologación del motor, la Directiva 1999/96/CE del Parlamento Europeo, en el cual se expresan los límites de emisión para cada sustancia, a medida que las diversas fases de la norma entran en vigor, además de cuáles son los métodos de ensayo y los sistemas de medida a emplear para determinar las emisiones.

3.2 Condiciones de la sala de ensayo

La sala de ensayos es el recinto requerido para el ensayo de cada uno de los motores. Este habitáculo, dada la presencia de un motor térmico y una gran cantidad de dispositivos instalados además de la necesidad de paso del personal involucrado en la tarea experimental, debe cumplir los siguientes requisitos:

3.2.1. Dimensiones y accesibilidad

Las dimensiones de la sala de ensayos deben ser suficientes para facilitar la ejecución de todas las operaciones necesarias, tanto en relación con el funcionamiento del motor como en lo referido al montaje y la supervisión de todos los elementos. Este hecho supone que la accesibilidad alrededor del banco en el que está montado el motor ha de ser suficiente para un cómodo acceso del personal.

Así las zonas de acceso para el mantenimiento y uso de la instalación disponen de una altura libre desde el suelo no inferior a 2 metros y un paso libre de al menos 50 centímetros.

La sala de ensayos ha de tener las dimensiones necesarias para permitir en todo momento la ejecución de los trabajos de montaje, mantenimiento e inspección que sean necesarios, sin peligro para las personas ni para la instalación. Para ello, se situará el motor de forma que la mayoría de sus partes resulten accesibles, siendo recomendable su situación en el centro de la sala. La distancia libre alrededor del motor será como mínimo de 1 metro.

El acceso a la sala se realizará a través de una puerta insonorizada, de al menos 1m de ancho, para permitir el paso de equipos. Además el laboratorio ha de disponer de una salida directa al exterior, y el camino desde cualquier punto de la sala hasta el exterior ha de ser lo más corto posible y encontrarse siempre libre de obstáculos.

Todo debe estar normalizado según el plan contraincendios de la instalación.

El acceso al laboratorio de ensayos estará restringido al personal autorizado.

Las puertas deberán ser además metálicas y de un espesor suficiente para el correcto aislamiento (térmico y sonoro) de la sala. Su apertura deberá ser hacia el exterior de la sala y para su accionamiento debe ser suficiente con un leve empujón hacia el exterior y con una manivela hacia el interior.

Además de todo esto, la instalación de los motores dentro de la sala de ensayos debe ser tal que permita la fácil supervisión, mantenimiento o sustitución de cualquiera de sus piezas, sin que por ello el personal corra peligro de daño alguno.

3.2.2. Ventilación y sistema de extracción de gases

El local ha de estar permanentemente ventilado cuando el motor esté en funcionamiento. Por tanto debe haber un aporte continuo de aire limpio desde el exterior y, del mismo modo, será necesaria una continua extracción de los gases quemados generados por el motor.

Los conductos de gases deben ser completamente estancos, e instalarse en lugares en que no entorpezcan el entorno de la sala. Las partes de conductos de transporte de los gases de escape o fluidos a altas temperaturas, y que sean accesibles normalmente a las personas deberán disponer de aislamiento térmico de protección.

Si la sala de ensayos linda con el exterior (patios, solares, etc.), ésta debe disponer en algún lugar de su parte inferior de unas aperturas cuya sección total vendrá dada por la expresión que se muestra a continuación:

$$S_1 \text{ cm}^2 = \frac{Q}{500} \quad (1)$$

Donde Q es la potencia calorífica total de los equipos de combustión instalados. En el caso de que el valor resultante para esta superficie sea menor que 0.25 m^2 , se adoptará éste valor como mínimo.

En la parte superior de una de las paredes que dé al exterior, o en el techo, y en la posición opuesta a las aperturas de entrada de aire, se dispondrán las aperturas para la salida del mismo hacia el exterior. Estas aperturas de salida deberán disponer de una sección total que vendrá definida por la expresión:

$$S_2 = \frac{S_1}{2} \quad (2)$$

En los locales interiores aislados sin posibilidad de llegada de aire por circulación natural, se deben disponer llegadas canalizadas de aire, utilizándose los ventiladores adecuados, los cuales deben generar al menos un caudal mínimo de $1.8 \text{ m}^3/\text{h}$. En ambos casos, para el cálculo de la superficie ventilada, se tendrá únicamente en cuenta el área libre, cualquiera que sea la forma, disposición y material de la rejilla

o protección situada sobre la apertura de acceso del aire. En ningún momento se permitirá la presencia de obstáculo alguno que interfiera o impida la libre circulación del aire en la salida.

3.2.3. Condiciones de hermeticidad de la sala

Los motores que se van a ensayar en estas salas funcionan con combustibles muy volátiles. Es por ello que por motivos de seguridad, la sala deberá ser estanca respecto a las instalaciones colindantes. De esta forma no debe existir conexión a través de puertas o ventanas o cualquier otro tipo de aperturas entre la sala y otros locales contiguos que puedan contener productos susceptibles de explosión.

Además, por este mismo motivo, los pasos de conducciones a través de suelos, techos y paredes han de ser del mismo modo estancos, permitiéndose únicamente la ventilación por los conductos dispuestos para la misma.

3.2.4. Aislamiento térmico, acústico y vibraciones

En cuanto al aislamiento térmico, todas las superficies que sean susceptibles de exceder la temperatura de 80°C, deben estar convenientemente aisladas en aquellas zonas donde exista riesgo de contacto con elementos para los que dicho nivel de temperatura pueda resultar de alguna manera peligroso. Como sería el caso de posible contacto con el personal de la sala o con algunos materiales, como pueden ser recubrimientos plásticos de los conductores.

En cuanto al aislamiento acústico, debido a la naturaleza de los ensayos, habrá que hacer especial hincapié en las condiciones de la sala, dado que durante los ensayos, los niveles de ruido llegan a alcanzar en algunos casos valores superiores a 120 dB. Por tanto, las paredes, el suelo y los techos de la sala de ensayos han de tener el adecuado aislante acústico para aislar al resto de los habitáculos. Además, si los puestos de trabajo están muy próximos a la sala, los operarios deberán ir protegidos con cascos.

En cuanto a las vibraciones, la estructura de la sala debe ser independiente de la del resto del edificio, de tal forma que no transmita vibraciones.

3.2.5. Iluminación

Siguiendo la recomendaciones de la norma DIN 5035, deberá disponerse en la sala de los elementos de iluminación necesarios para asegurar un nivel de iluminancia 7 (750 lux), intermedio entre el correspondiente a “Tareas visuales normales y detalles de tamaño medio con contrastes reducidos” y el correspondiente a “Tareas visuales muy difíciles, pequeños detalles con contrastes reducidos”.

La sala de ensayos debe disponer de la adecuada iluminación, teniendo en cuenta que existen ciertos dispositivos que deben ser controlados durante los ensayos. La iluminación se hará por medio de tubos fluorescentes dispuestos en varias luminarias.

3.2.6. Protección eléctrica

Para evitar posibles accidentes, debe situarse un interruptor de energía en el exterior de la sala, y en un punto desde el que sea posible cortar el suministro de tensión eléctrica de la totalidad de los equipos instalados en el banco de ensayos.

3.2.7. Almacenamiento y suministro de combustible

El almacenamiento de combustible no tendrá lugar en el interior de la sala, sino en depósitos exteriores a ella. Existirá un almacenamiento principal de combustible diésel, exterior al edificio y enterrado, en tanque de acero de gran capacidad y que cumpla con la norma UNE 62350: “Tanques de acero para almacenamiento de carburantes combustibles líquidos. Tanques de capacidad mayor de 3000 litros”.

Desde aquí el combustible será bombeado hasta un depósito aéreo de menor capacidad, situado en la cubierta del edificio, cuya instalación deberá cumplir con la norma UNE 109501: 1996 IN “Instalación de tanques de acero aéreos o en fosa para almacenamiento de carburantes y combustibles líquidos”. Desde este depósito fluirá por gravedad el combustible hacia las salas de ensayo.

3.2.8. Otros requisitos

Toda la sala de ensayos ha de estar libre de polvo, gases o vapores inflamables, para evitar riesgos eléctricos o de explosión. Por ello, no deberá existir conexión directa a través de las puertas, ventanas o cualquier otro tipo de aberturas entre la sala de ensayos y otros locales contiguos que puedan contener sustancias susceptibles de inflamarse o explotar.

En la sala de ensayos solo podrán instalarse las máquinas y aparatos necesarios para su servicio, así como los elementos productores o impulsores de los fluidos necesarios para el funcionamiento. El puesto de las personas encargadas de la realización de los ensayos y del manejo de los equipos de adquisición de datos ha de situarse en el exterior de la sala.

Será necesario, pues, la colocación de una zona de control acristalada para permitir el control visual de la instalación y la detección de posibles problemas durante el funcionamiento. En algún lugar visible del interior de la sala, se colocará un esquema del motor con sus elementos principales.

El control de la instalación debe realizarse desde un compartimento exterior a la habitación donde se encuentra el motor.

El suelo debe ser antideslizante.

3.2.9. Condiciones de la instalación del motor

- La transmisión de potencia al freno debe estar protegida con un elemento suficientemente rígido para evitar que algún elemento de la transmisión pueda salir despedido en caso de rotura fortuita de la misma o que se

produzca la proyección de algunos de sus elementos de anclaje. De igual forma que ocurre con la transmisión desde el motor eléctrico al freno.

- El volante de inercia del motor debe de estar protegido adecuadamente, para evitar la salida del mismo o de alguna de sus partes de anclaje, en caso de avería durante el funcionamiento del motor.
- Los sistemas de venteo o de calibración de equipos que operen con fluidos nocivos (acondicionador de combustible, medidor de humos de escape, medidor del gas de soplado Blow-by...) han de tener el desahogo en el exterior de la sala de ensayos.
- El motor, dinamofreno, depósito de remanso han de estar eléctricamente conectados a tierra, para evitar el peligro de posibles derivaciones de los aparatos eléctricos de la instalación.
- Todos los componentes de la instalación han de estar accesibles sin peligro de lesión por interferencia de otras piezas. Se ha de asegurar una accesibilidad mecánica rápida y segura.
- En el caso de que se produzca alguna alarma que indique el desalojo de la sala y del laboratorio, proceder de la forma más rápida y ordenada posible.

3.3 Tarado del instrumental

En los instrumentos de medida siempre existe una relación entre los valores de las magnitudes medidas y las reales. Siempre que el valor medido por el instrumento corresponda con el valor real, se estará efectuando una medida correcta.

En la práctica, los instrumentos ofrecen valores inexactos que se apartan en mayor o menor medida del valor real dependiendo del tipo y la calidad del instrumento. De esta forma, el tarado o calibración de la instrumentación consiste en eliminar o reducir al mínimo este error en todo el campo de medida. Los elementos de la instalación susceptibles de ser calibrados son los que se especifican a continuación.

3.3.1. Tarado del tacómetro

Para la calibración del tacómetro magnético se empleará otro tacómetro óptico. El método de calibrado consistirá únicamente en comprobar las lecturas de los dos tacómetros a distintos regímenes.

3.3.2. Tarado del codificador angular

La calibración del codificador angular consistirá simplemente en determinar la posición relativa entre el disco graduado del codificador angular y el pistón del motor. Para la determinación del desfase, será necesario un captador de presión piezoeléctrico y una cadena de medida. Mediante un software preparado para este fin, se registrarán ficheros de presión en el registrador oscilográfico a distintos regímenes y el programa se encargará de obtener el desfase a partir de la señal del codificador y del captador de proximidad.

3.3.3. Tarado de los sensores piezorresistivos

El tarado del captador de presión consiste en determinar la tensión de salida que se obtiene en el acondicionador, en función de la presión aplicada en el captador, de forma que se ajustan los puntos obtenidos en una recta.

Para la determinación de los puntos, se monta el captador junto con su acondicionador y su cable, de forma que se calibra todo el conjunto completo.

Mediante un pistón hidráulico y un husillo se le aplica presión, valor el cual se anota junto a la presión obtenida a través de la tensión de salida. Con estos valores se podrá obtener un parámetro corrector que se introducirá en el acondicionador de señal.

3.3.4. Tarado de los transductores de presión media

El tarado de los sensores de presión media se realiza mediante un generador de funciones. Este equipo es capaz de generar tanto una tensión como una corriente que es constante y regulable con el fin de poder estabilizar la lectura en todo el rango de funcionamiento del sensor.

El equipo de calibración introduce una señal en el sensor mediante su interconexión, y por otro lado se mide la lectura que está generando el sensor mediante el sistema de adquisición de datos. Mediante la comparación del valor real que se le introduce al sensor y la lectura que este está realizando, se puede corregir por software o mediante el ajuste físico del *offset* del sensor o de la pendiente de su recta de calibración el valor obtenido y por tanto se realiza así su calibración.

Para una correcta calibración se realizan ajustes en varios puntos del rango de funcionamiento del sensor.

3.3.5. Tarado de balanza gravimétrica

El medidor de combustible dispone de dos funciones para propósitos de calibración, estas se describen a continuación:

- **Control de precisión:** Como su propio nombre indica, lo que realiza es un control de la precisión de las medidas, es decir, indica el grado de error existente en la masa de combustible medida, añadiéndole una pesa con una masa conocida (90 gr.) y obteniendo un valor de la masa total. Este chequeo dura aproximadamente 1 minuto, y se puede realizar con el motor en funcionamiento gracias a una válvula de by-pass de accionamiento neumático. Como resultado nos da un valor, que ha de encontrarse en un intervalo ($\pm 2^0/100$) para no tener que realizar una calibración. Se acciona manualmente desde el PC.
- **Calibración:** Se puede realizar con el motor en funcionamiento gracias a una válvula de by-pass. Se acciona desde el PC. Lo que realiza el equipo es un vaciado de la balanza y coloca una pesa de 90 gr. En este momento, adopta el valor de cero, para después llenar progresivamente la balanza

e ir añadiendo la pesa de 90 gr. Cada vez que se alcanza una masa de combustible predeterminada, realiza esta operación, de esta forma es capaz de trazarse la recta de calibración.

3.3.6. Tarado del medidor volumétrico de aire

El tarado de este equipo no es una calibración propiamente dicha si no una comprobación de lo bien o de lo mal que se está realizando la medida de este parámetro. Para comprobar esta medida lo que se hace es desmontar el equipo y montarlo en el banco de flujo con que cuenta el departamento. El montaje se realiza en serie con un compresor que trabaja en aspiración y con un medidor de hilo caliente (Sensy-flow). Para comprobar la bondad de la medida de aire, lo que se hace es poner el compresor a girar y medir la masa de aire mediante el Sensy-flow, el medidor volumétrico y mediante unas columnas rectas de agua o de mercurio según el rango a comprobar.

De esta manera se comprueba la precisión de la medida de la masa de aire consumida por el motor. Cabe decir que el sensy-flow utilizado para esta comprobación se recalibra por parte del fabricante cada año y por tanto es el elemento que sirve como patrón para la comprobación de esta medida.

4. Normativa a cumplir por los operadores

Hasta ahora se ha hablado de las condiciones generales de seguridad y salud del puesto de trabajo, así como de las condiciones particulares que debían cumplir la sala de ensayos y los diversos elementos instalados en ella. En esta sección del pliego de condiciones se encuentran las normas específicas de trabajo de los operadores así como las recomendaciones de la Society of Automotive Engineers.

4.1 Normas para los operadores

- Conectar la extracción de la sala siempre antes de empezar los ensayos. En caso de que este sistema no funcione, no se debe arrancar el motor hasta que el problema sea subsanado.
- Evitar el derrame de aceite y combustible y limpiarlos inmediatamente en caso de que se produzca este hecho.
- Ensayar siempre con la puerta de la sala cerrada.
- Queda terminantemente prohibido el acceso a la sala durante el desarrollo de un ensayo.
- Las operaciones que puedan conllevar algún tipo de peligro en su realización, deberán ser ejecutadas por personal especializado y dotado de los medios de protección oportunos (guantes, gafas de protección ocular, etc...).

- En el laboratorio existen medios necesarios para afrontar pequeñas lesiones. En caso de lesiones de mayor envergadura se deberá acudir a los servicios sanitarios de la Universidad.

4.2 Recomendaciones S.A.E.

Las siguientes recomendaciones se han obtenido de las publicaciones S.A.E. (Society of Automotive Engineers), recogiendo únicamente aquellas que afectan directamente o pueden estar relacionadas con la práctica de ensayos de motores en banco de pruebas. Se han obtenido de la norma SAE-J153, "Consideraciones de seguridad para operadores". Estas recomendaciones son:

1. Perfecto conocimiento, por parte de los operadores, de las funciones de todos los controles antes de comenzar las operaciones.
2. Asegurarse de verificar todos los controles en el área de seguridad, antes de comenzar el trabajo.
3. En cualquiera de los casos, el personal deberá despojarse de las prendas de abrigo y utilizar ropas adecuadas.
4. Conocimiento del equipo de seguridad requerido por la máquina y asegurar la perfecta utilización del mismo.
5. Corregir los defectos de la máquina antes de comenzar su periodo de funcionamiento normal.
6. Recoger todos los objetos y herramientas abandonadas cerca o incluso sobre la superficie de la máquina.
7. Poner especial atención si se trata de una máquina con la que normalmente no se ha operado.
8. No realizar apresuradamente las operaciones de montaje y desmontaje de la máquina.
9. Bajo ningún concepto, desatender la máquina mientras esta se encuentre en funcionamiento.
10. Comprobar periódicamente el perfecto funcionamiento de los elementos de alarma, luces de emergencia, etc.
11. Tener constancia de cualquier defecto que surja en la máquina durante el funcionamiento de la misma.
12. Observar los instrumentos frecuentemente, verificando en cualquier situación que la máquina está funcionando correctamente.
13. Mantener la máquina bajo el control de sus limitaciones y no apresurarse en la realización de los ensayos.
14. En ningún caso, no se realizarán manipulaciones o ajustes sobre la máquina cuando esta ya se encuentre en funcionamiento.
15. No se debe permitir fumar si durante el funcionamiento de la máquina se emplean combustibles.
16. Descargar toda la presión mientras se trabaja en sistemas que posean acumuladores de presión.

17. No intentar reparar lo que no se entienda profundamente.

5. Condiciones técnicas del equipo de trabajo

Los requisitos mínimos que debe cumplir el equipo informático de trabajo son los siguientes:

- Procesador Intel Centrino 1.73 GHz con cache L1 de 512 KB, o similar.
- Memoria DIMM 2 GB DDR a 666 MHz.
- Memoria de almacenamiento: 500 GB.
- Tarjeta gráfica Geforce Go 6200, o similar.
- Sistema operativo Windows XP.
- Software básico: Microsoft office 2007 (Excel), Grapher 7.0, Matlab 7.
- Lector CD/DVD.
- Puertos USB.

DOCUMENTO III

PRESUPUESTO

1. Presupuesto de ingeniería

La presente sección tiene como objetivo conocer los costes de la ejecución del presente estudio. El estudio se estructura en el presupuesto relativo a la mano de obra, gastos derivados de los ensayos, equipos de medida empleados y los materiales fungibles gastados durante la realización del proyecto.

Como se verá en los próximos apartados, los precios aplicados a los costes se corresponden con los precios de las tarifas legales y que se encuentran vigentes. También, en determinadas situaciones se han realizado las estimaciones oportunas guardando coherencia para con el proyecto.

El trabajo realizado se ha realizado en el seno de las instalaciones del CMT-Motores Térmicos y está destinado a investigaciones internas del propio departamento, por lo que no incluirá el coste asociado al IVA ni el beneficio industrial. Sin embargo, si el trabajo resultara ser un encargo de una empresa ajena al departamento, se deberían añadir estos costes en el presupuesto total.

1.1 Descripción del método presupuestado

En este apartado se describen las partidas presupuestarias en las que se desglosa el presupuesto global y se explica el sistema empleado en la estimación de las amortizaciones de los bienes de equipo.

1.1.1. Mano de obra

El coste de mano de obra engloba los gastos del personal partícipe en la ejecución del presente proyecto. Se valora a través del rendimiento, en horas, de los recursos humanos y su precio unitario se expresa en euros/hora. En el caso particular de este proyecto se incluyen un ingeniero industrial, doctor por la Universidad Politécnica de Valencia, un ingeniero industrial, doctorando, y un becario en ingeniería aeroespacial.

1.1.2. Utilización de bienes de equipo

Todos los bienes de equipo empleados para los ensayos forman parte del conjunto de bienes de equipo del CMT-Motores Térmicos y, por lo tanto, no se ha considerado el precio de adquisición de éstos, sino que se han considerado los costes de amortización. Los bienes de equipo empleados son los siguientes:

Equipos experimentales

- Bancada fija.
- Motor de combustión interna alternativo en producción de GM.
- Sistema de refrigeración.
- Sistema de alimentación de combustible.

- Sistemas de adquisición de datos: DRIVVEN, SAMARUC.
- Sensores empleados para la medición de presión, temperatura, etc.
- Sistema de medición de radiación, sonda optoelectrónica VisioFem.

Para cada uno de ellos, la amortización es calculada de la siguiente manera:

$$a = \frac{VC - VR}{n} \quad (1)$$

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

Donde:

a : Amortización, en euros/año

VC : Valor de compra, en euros

VR : Valor residual al cabo del periodo de amortización, en euros

n : Periodo de amortización, en años

t_h : Tasa horaria, en euros/hora

h : Horas trabajadas al año

La tasa horaria de cada concepto anteriormente enumerado se plasma en el presupuesto parcial como precio unitario.

Equipos personales

Este grupo incluye los ordenadores personales, utilización de impresoras y licencias de software (Microsoft Office, Matlab; Grapher, CALMEC) utilizados para poder llevar a cabo la realización del presente proyecto.

La amortización de estos equipos se ha incorporado directamente a los presupuestos parciales a través de la estimación de un precio unitario en el que se ha tenido en cuenta el coste de adquisición y la vida del sistema.

1.1.3. Materiales

Dentro de este grupo de costes se incluye el material no amortizable que ha sido adquirido para realizar el proyecto, de modo que tan sólo se tiene en cuenta su precio de compra y la cantidad empleada. Esta partida abarca los costes de material de oficina, combustible, así como la energía eléctrica necesaria para la realización de los ensayos y alimentación de los sistemas informáticos.

1.2 Justificación de los precios

Esta sección pretende mostrar la descomposición de los precios de la mano de obra. Los salarios brutos anuales se han extraído del Boletín Oficial del Estado de éste año.

1.2.1. Mano de obra

Coste asociado a un Doctor Contratado, Profesor del Departamento

Para el cálculo del precio/hora se han empleado las siguientes formulas:

$$\frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{año}} = \left[\frac{\text{sem}}{\text{año}} - \frac{\text{sem}_{\text{vacaciones, festivos}}}{\text{año}} \right] * \frac{\text{horas trabajadas}}{\text{sem}} \quad (2)$$

$$\frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{año}} = 52 - 6 * 40 = 1840 \frac{\text{horas}}{\text{año}}$$

$$\text{Coste horario} = \frac{\text{Salario bruto anual}}{\frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{año}}} \quad (3)$$

$$\text{Coste horario} = \frac{32318.80}{1840} = 17.56 \text{ euros/hora}$$

Coste asociado a un Ingeniero Industrial Superior, Doctorando

Para el cálculo del precio/hora se han aplicado las expresiones anteriores, de la ecuación (2) por lo tanto:

$$\frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{año}} = 52 - 6 * 40 = 1840 \frac{\text{horas}}{\text{año}}$$

De la ecuación (3):

$$\text{Coste horario} = \frac{14076.00}{1840} = 7.65 \text{ euros/hora}$$

Coste asociado a un ingeniero aeroespacial proyectando

La presente investigación ha sido realizada por un ingeniero aeroespacial llevando a cabo su trabajo final de grado, por lo tanto, el salario bruto mensual es el correspondiente a la beca de colaboración pertinente, en este caso corresponde a un salario bruto mensual de 250 euros/mes. La duración de esta beca es de 8 meses, y se exigen 3 horas trabajadas al día, por lo tanto 15 horas/semana.

Se calcula, por lo tanto, con las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{mes}} = \text{Dias laborables mes} * \frac{\text{hora trabajadas}}{\text{dia}} \quad (4)$$

$$\frac{\text{Horas trabajadas}}{\text{mes}} = 5 * 3 * 4 = 60 \frac{\text{horas}}{\text{mes}}$$

$$Coste\ horario = \frac{Salario\ bruto\ mes}{\frac{Horas\ trabajadas}{mes}} \quad (5)$$

$$Coste\ horario = \frac{250}{60} = 4.16\ euros/hora$$

1.3 Cuadro de precios descompuestos

Para la elaboración de los precios descompuestos de han diferenciado los siguientes bloques:

- Recursos humanos: El coste de la mano de obra del proyecto.
- Gastos de equipos y materiales: equipos que se han requerido exclusivamente para este proyecto.
- Amortización de equipos de la instalación: equipos cuyo coste se debe amortizar. Estos son requeridos por distintos proyectos del departamento, y para hallar su presupuesto se consideran como “alquilados”.

El tiempo total fijado para la amortización de estos equipos es de 10 años, es decir, 120 meses.

Como el presente proyecto se ha elaborado en 8 meses, la proporción a amortizar del coste total de los equipos es la siguiente:

$$\frac{8}{120} = 0.0667 = 6.67\ %$$

Por lo tanto, en los presupuestos parciales que haya alguna amortización se multiplicará el coste del equipo a amortizar por 0,0667. Con ello se obtendrá la parte del coste total del equipo que pertenece a este proyecto.

Cuadro de precios de amortización de equipos.

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio(€)	Amortiz. (%)	Importe(€)
ud	Sala de ensayos	1	240500.00	6.67	16041.35
ud	Sistema de control de la sala	1	5000.00	6.67	333.50
ud	Licencias programas informáticos	1	35000.00	6.67	2334.50
ud	Modulo termopares	1	425.00	6.67	28.35
ud	Modulo entradas analógicas	1	425.00	6.67	28.35
ud	Modulo entradas digitales	1	495.00	6.67	33.02
ud	Caudalímetro	1	6000.00	6.67	400.10
ud	Sensor de presión Kistler	1	184.00	6.67	12.27

ud	Codificador angular	1	3000.00	6.67	200.10
ud	Termopares tipo K	1	42.00	6.67	2.80
ud	Sonda VisioFem	1	63000.00	6.67	4202.10
ud	Motor producción GM	1	100000.00	6.67	6670.00
ud	Equipo informático	1	1500.00	6.67	100.05

Tabla 1.1. Cuadro de precios.

En la Tabla 1.1 se muestran los precios que se aplicaran en los cuadros de presupuesto descompuestos que se muestran a continuación. Estos precios corresponden al valor de la amortización total para el periodo de tiempo que dura la investigación, que son 8 meses, idéntico aproximadamente a la duración de la beca.

Las Tablas 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 y 1.7 muestran los presupuestos descompuestos según conceptos.

Concepto: Reuniones entre todos los miembros que componen el proyecto.				
Unidad	Descripción	Cantidad	Precio(€/h)	Importe(€)
h	Doctor Profesor del departamento	7	17.56	122.92
h	Ingeniero industrial superior doctorando	7	7.65	53.55
h	Ingeniero aeronáutico proyectando	7	4.16	29.12
Total				205.59

Tabla 1.2. Precios descompuestos. Partida Reuniones.

Concepto: Estudio bibliográfico.				
Unidad	Descripción	Cantidad	Precio(€)	Importe(€)
h	Doctor Profesor del departamento	210	17.56	3687.60
h	Ingeniero industrial superior doctorando	210	7.65	1606.50
h	Ingeniero aeronáutico proyectando	150	4.16	624.00
h	Equipo informático	1	100.05	100.05
Total				6018.15

Tabla 1.3. Precios descompuestos. Partida Estudio Bibliográfico.

Concepto: Realización ensayos y adquisición de datos.				
Unidad	Descripción	Cantidad	Precio(€)	Importe(€)
ud	Sala de ensayos	1	16041.35	16041.35
ud	Sistema de control de la sala	1	333.50	333.50
ud	Licencias programas informáticos	1	2334.50	2334.50
ud	Modulo termopares	1	28.35	28.35
ud	Modulo entradas analógicas	1	28.35	28.35
ud	Modulo entradas digitales	1	33.02	33.02
ud	Caudalímetro	1	400.10	400.10
ud	Sensor de presión Kistler	1	12.27	12.27
ud	Codificador angular	1	200.10	200.10
ud	Termopares tipo K	1	2.80	2.80
ud	Sonda VisioFem	1	4202.10	4202.10
ud	Motor producción GM	1	6670.00	6670.00
ud	Equipo informático	1	100.05	100.05
h	Ingeniero industrial superior doctorando	160	7.65	1224.00
h	Ingeniero aeronáutico proyectando	10	4.16	41.60
Total				31652.19

Tabla 1.4. Precios descompuestos. Partida Realización de Ensayos.

Concepto: Procesado de datos.				
Unidad	Descripción	Cantidad	Precio(€)	Importe(€)
h	Ingeniero industrial superior doctorando	160	7.65	1224.00
h	Ingeniero aeronáutico proyectando	160	4.16	665.60
ud	Equipo informático	1	100.05	100.05
Total				1989.65

Tabla 1.5. Precios descompuestos. Partida Procesado de datos.

Concepto: Material fungible.				
Unidad	Descripción	Cantidad	Precio(€)	Importe(€)
l	Combustible (diésel)	20	1.15	23.00
kW	Energía eléctrica	700	0.13	91.00
ud	Material de oficina	1	42.00	42.00
Total				156.00

Tabla 1.6. Precios descompuestos. Partida Material fungible.

Concepto: Redacción del proyecto.				
Unidad	Descripción	Cantidad	Precio(€)	Importe(€)
h	Doctor Profesor del departamento	2	17.56	35.12
h	Ingeniero industrial superior doctorando	5	7.65	38.25
h	Ingeniero aeronáutico proyectando	153	4.16	636.48
Total				709.85

Tabla 1.7. Precios descompuestos. Partida Redacción del proyecto.

1.4 Presupuesto total

PRESUPUESTO TOTAL			
Concepto	Unidades	Precio(€)	Importe(€)
Reuniones	1	205.59	205.59
Estudio bibliográfico	1	6018.15	6018.15
Realización ensayos y adquisición de datos	1	31652.19	31652.19
Procesado de datos	1	1989.65	1989.65
Material fungible	1	156.00	156.00
Redacción del proyecto	1	709.85	709.85
Total			40731.43

Tabla 1.8. Presupuesto total.

El presupuesto total del presente proyecto asciende a un total de **CUARENTA MIL SETECIENTOS TREINTA Y UN EUROS CON CUARENTA Y TRES CÉNTIMOS.**