



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Aplicación de técnicas ópticas para el análisis de los
procesos de combustión y formación de hollín en motor
óptico empleando combustibles alternativos

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Gutiérrez Viña, Adrián

Tutor/a: Pastor Soriano, José Vicente

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño



Aplicación de técnicas ópticas para el análisis de los procesos de combustión y formación de hollín en motor óptico empleando combustibles alternativos

Septiembre de 2022

Autor: Adrián Gutiérrez Viña

Tutor: José Vicente Pastor Soriano

Agradecimientos

Me gustaría aprovechar la ocasión que se me brinda en este trabajo para agradecer todo el apoyo que he recibido durante estos años de carrera y, en especial durante estos meses de realización del proyecto. En primer lugar, me gustaría agradecer a mi tutor José Vicente Pastor por haberme dado la posibilidad de realizar este proyecto, trabajando codo con codo con los compañeros del departamento de Técnicas Ópticas y permitiéndome obtener una visión más clara de cuáles son sus labores de investigación y cómo afrontan los desafíos que surgen en el mundo actual. También gracias por la constante atención y la ayuda que me has proporcionado cuando la he necesitado, ha sido un enorme placer. Seguidamente, me gustaría agradecer a Francisco José Tejada el trato que me ha dado desde el primer día, me has hecho sentir como en casa en un entorno de trabajo completamente desconocido para mí y no podría estarte más agradecido por haberme atendido en tus ratos libres, haberme dedicado tiempo por videoconferencias e incluso durante tus vacaciones. Me has transmitido tu pasión por el mundo del motor y eso es algo que me llevo muy dentro, te considero un buen amigo, compañero. Del mismo modo, gracias al resto de compañeros del departamento por amenizar las jornadas de trabajo. Por supuesto, muchas gracias a toda mi familia, gracias a mis padres por el apoyo incondicional en todos los aspectos de la vida, por ayudarme a no tirar la toalla cuando las cosas se complican y por aguantarme cuando soy inaguantable, sois un ejemplo para mí. Gracias también, y en especial, a mi hermano Manu. Te admiro tío, estoy muy orgulloso de ti y de cómo consigues todo lo que quieres, sigue siempre tus objetivos, aunque no siempre los tengas claros, sabes que puedes contar conmigo para lo que sea. Silvia, no podria estar-te més agraït pels anys que m'has donat a València, eres el meu motor, sempre m'has fet sentir capaç i ningú més que tu ha hagut d'aguantar els meus patiments i les meues històries. Gràcies per tindre sempre un somriure per mi, gràcies per fer-me la vida més fàcil i gràcies per estimar-me com només tu ho saps fer.

Por último, me gustaría agradecer a la Universitat Politècnica de València y a los profesores que me han acompañado durante todos estos años de formación académica, profesional y personal, así como mis amigos y compañeros con los que empecé esta aventura y a los amigos y compañeros con los que la acabo.

Adrián Gutiérrez Viña
adguvi@etsid.upv.es

Resumen

La necesidad de reducir las emisiones contaminantes de los motores de combustión interna y las estrictas normas que las regulan han despertado el interés por la búsqueda de combustibles alternativos limpios para sustituir el diésel fósil y su evaluación en condiciones de operación en motor. Los combustibles alternativos, en concreto los pertenecientes a la familia de los *e-fuels*, presentan alto potencial de reducción de la huella de carbono, así como una alta capacidad para reducir la formación de hollín dentro del cilindro, el cual es uno de los principales contaminantes del motor de encendido por compresión. El principal objetivo de este trabajo es la realización del procesado y post-procesado de la información registrada en ensayos experimentales, previamente realizados, mediante la aplicación de técnicas ópticas, que permitan una mayor comprensión sobre los procesos físico-químicos que tienen lugar durante la combustión. Los ensayos se llevaron a cabo en un motor óptico monocilíndrico de mediana cilindrada (0.825 litros por cilindro) de encendido por compresión, con acceso óptico inferior a través del pistón, que permite la visualización directa de los fenómenos que tienen lugar en el interior de la cámara de combustión. A lo largo de este trabajo se hace énfasis en la relevancia que adquieren dichos combustibles a la hora de modificar condiciones de operación del motor, así como en la necesidad de asegurar la compatibilidad entre la operación realista del mismo y el empleo de técnicas de visualización para la caracterización de la combustión. Además, el estudio se complementa con un análisis termodinámico mediante el registro de la presión en el cilindro. Los diferentes ensayos se realizaron utilizando diversas mezclas en distintas proporciones de combustible diésel y oxymethylene dimethyl ether (OME_X), con el objetivo de poner de manifiesto las principales diferencias entre ellas, en materia de desarrollo de la combustión y emisiones de hollín. Los resultados obtenidos muestran que el aumento de OME_X en la mezcla produce una disminución en la formación de hollín, sin embargo, su menor poder calorífico inferior requiere inyectar más combustible para alcanzar la misma energía liberada en el proceso, lo que implica usar estrategias de inyección diferentes. Además, su baja viscosidad y lubricidad puede dañar el sistema de inyección si se usa como combustible puro, por lo que requeriría realizar modificaciones importantes en el diseño del motor. Sin embargo, se ha demostrado que resulta una alternativa viable cuando se mezcla con diésel convencional para la reducción de emisiones de hollín, aprovechando su potencial sin la necesidad de las mencionadas modificaciones.

Palabras clave: Motor óptico, *e-fuels*, técnicas ópticas, emisiones de hollín

Resum

La necessitat de reduir les emissions contaminants dels motors de combustió interna i les estrictes normes que les regulen han despertat l'interès per la recerca de combustibles alternatius nets per substituir el dièsel fòssil i la seua avaluació en condicions d'operació en motor. Els combustibles alternatius, en concret els que pertanyen a la família dels *e-fuels*, presenten alt potencial de reducció de petjada de carboni, així com una alta capacitat per reduir la formació de sutge dins del cilindre, el qual és un dels principals contaminants del motor d'encès per compressió. El principal objectiu d'aquest treball és la realització del processat i post-processat de la informació registrada en assajos experimentals, prèviament realitzats, mitjançant l'aplicació de tècniques òptiques, que permeten una major comprensió sobre els processos físic-químics que tenen lloc durant la combustió. Els assajos es van dur a terme a un motor òptic monocilíndric de cilindrada mitjana (0.825 litres per cilindre) d'encès per compressió, amb accés òptic inferior a través del pistó, que permet la visualització directa dels fenòmens que es produeixen a l'interior de la càmera de combustió. Al llarg d'aquest treball es fa èmfasi en la rellevància que adquireixen aquests combustibles a l'hora de modificar condicions d'operació del motor, així com en la necessitat d'assegurar la compatibilitat entre l'operació realista d'aquest i l'ús de tècniques de visualització per la caracterització de la combustió. A més, l'estudi es complementa amb una anàlisi termodinàmica mitjançant el registre de la pressió al cilindre. Els assajos es realitzen utilitzant diverses mescles en distintes proporcions de combustible dièsel i oxymethylene dimethyl ether (OME_X), amb l'objectiu de posar de manifest les principals diferències entre elles, en matèria de desenvolupament de la combustió i emissions de sutge. Els resultats obtinguts mostren que l'augment d' OME_X a la mescla produeix una disminució en la formació de sutge, no obstant això, el seu menor poder calorífic inferior requereix injectar més combustible per assolir la mateixa energia alliberada en el procés, el que implica l'ús d'estratègies d'injecció diferents. A més, la seua baixa viscositat i lubricitat pot fer malbé el sistema d'injecció si s'utilitza com a combustible pur, pel qual requeriria realitzar modificacions importants al disseny del motor. Tanmateix, s'ha demostrat que resulta una alternativa viable quan es mescla amb dièsel convencional per la reducció d'emissions de sutge, aprofitant el seu potencial sense la necessitat de les esmentades modificacions.

Paraules clau: Motor òptic, *e-fuels*, tècniques òptiques, emissions de sutge

Abstract

The need to reduce pollutant emissions from Internal Combustion Engines and the strict standards that regulate them have sparked interest in the search for clean alternative fuels to replace fossil diesel and their evaluation under engine operating conditions. Alternative fuels, specifically those belonging to the family of e-fuels, have a high potential for reducing the carbon footprint, as well as a high capacity to reduce the formation of soot inside the cylinder, which is one of the main contaminants from the compression ignition engine. The main objective of this work is to carry out the processing and post-processing of the information recorded in experimental tests, previously carried out, through the application of optical techniques, which allow a greater understanding of the physical-chemical processes that take place during combustion. The tests were carried out on a Medium Duty single-cylinder optical engine (0.825 liters per cylinder) with compression ignition is used, with lower optical access through the piston, which allows direct visualization of the phenomena that take place inside the combustion chamber. Throughout this work, emphasis is placed on the relevance that these fuels acquire when it comes to modifying engine operating conditions, as well as the need to ensure compatibility between its realistic operation and the use of visualization techniques to the characterization of combustion. In addition, the study is complemented with a thermodynamic analysis by recording the pressure in the cylinder. The tests are carried out using various blends in different proportions of diesel fuel and oxymethylene dimethyl ether (OME_X), with the aim of highlighting the main differences between them, in terms of combustion development and soot emissions. The results obtained show that the increase in OME_X in the mixture produces a decrease in the formation of soot, however, its smaller lower heating value requires injecting more fuel to achieve the same energy released in the process, which implies using different injection strategies. Furthermore, its low viscosity and lubricity can damage the injection system if it is used as pure fuel, thus requiring significant modifications to the engine design. However, it has been shown that it is a viable alternative when mixed with conventional diesel for the reduction of soot emissions, taking advantage of its potential without any engine hardware modification.

Key words: Optical engine, e-fuels, optical techniques, soot emissions

Índice general

Agradecimientos	iii
Resumen	v
Resum	v
Abstract	vii
Índice general	xi
Índice de figuras	xiv
Índice de tablas	xv
1 Introducción	1
1.1 Contexto actual	1
1.2 Objetivos y alcance del trabajo	3
2 Marco Teórico	5
2.1 El motor de combustión interna alternativo de encendido por compresión	5
2.1.1 El motor de combustión interna alternativo	5
2.1.2 Proceso de combustión en MEC	8
2.1.3 Formación de hollín	11
2.2 Estrategias de reducción de emisiones contaminantes	12
2.2.1 Normativa/Regulación actual	12
2.2.2 Técnicas para reducir emisiones contaminantes	14
2.3 Combustibles	16
2.3.1 Oxymethylene dimetil ether (OME _X)	18
2.4 Técnicas ópticas	19
2.4.1 Motor óptico	23
3 Metodología	25
3.1 Motor óptico	25
3.2 Condiciones de operación y estrategia de inyección	27
3.3 Combustibles	28
3.4 Instalación, equipo y técnicas empleadas	29
3.4.1 Quimioluminiscencia de OH*	31
3.4.2 Pirometría de dos colores	31
3.5 Procesado	33

3.5.1	Análisis termodinámico	33
3.5.2	Procesado de las imágenes	33
3.5.3	Quimioluminiscencia de OH*	35
3.5.4	Pirometría de dos colores	35
3.5.5	Mapas radiales	36
4	Resultados	37
4.1	Efecto de las condiciones de operación	37
4.2	Efecto de las mezclas de combustibles	41
4.2.1	Condición nominal	42
4.2.2	Condiciones de baja concentración de oxígeno	46
5	Conclusiones	51
	Bibliografía	53
A	KL_Image_Processed.m	57

Índice de figuras

1.1	Evolución del consumo energético global primario en función de la fuente (acumulado)	1
1.2	Evolución del consumo energético global primario en función de la fuente (individual)	1
1.3	Emisiones globales de gas de efecto invernadero por sector	2
1.4	Emisiones globales de CO ₂ del sector del transporte	2
2.1	Fases de un motor 4T	7
2.2	Diagrama de distribución de un motor 4T	8
2.3	Esquema de atomización primaria y secundaria del chorro de combustible	9
2.4	Fases de la combustión en un motor MEC	10
2.5	Concentraciones de NO _x y hollín en la cámara de combustión en función del CAD	10
2.6	Esquema modelo de llama en motor diésel	11
2.7	Proceso de formación de hollín	12
2.8	Producción de contaminantes en una cámara de combustión con mezcla heterogénea	12
2.9	Evolución de los límites europeos de emisiones de vehículos ligeros	14
2.10	Curva de <i>trade-off</i> de formación de hollín y NO _x en motores Diésel	15
2.11	Zonas de emisiones de NO _x y hollín en gráfica temperatura local-dosado local	16
2.12	Demanda de combustible global en el sector del transporte	17
2.13	Rutas de síntesis en fase líquida de OME _x a través de metanol derivado de diversas fuentes.	18
2.14	Representación esquemática de formación de partículas y NO _x frente a la tasa de EGR en un MEC para la combustión de (a) diésel y (b) OME _x puro	19
2.15	Cadena de funcionamiento del motor de combustión y herramientas ópticas de diagnóstico adecuadas	20
2.16	Espectro electromagnético	21
2.17	Espectro típico de llamas de gasóleo y gas	21
2.18	Espectro de emisión del cuerpo negro según Planck	22
2.19	Ejemplo de ensamblaje de un motor óptico diseñado en el CMT	23
3.1	Motor óptico Duramax diseñado en el CMT de la UPV	25
3.2	Sección del ensamblaje del motor óptico	26
3.3	Pistón de geometría real (reentrante)	27
3.4	Sección del pistón reentrante y movimiento de la llama	27
3.5	Estrategia de inyección	28
3.6	Equipo de medida	30
3.7	Configuración del montaje óptico	31
3.8	Software empleado para el procesado de la información	33
3.9	Tasas de liberación de calor para las diferentes mezclas de combustibles y condiciones de operación y liberación de calor acumulada	34

3.10	Imagen de una misma cámara para un instante CAD concreto antes y después de aplicar la máscara y el recorte	34
3.11	Representación de la intensidad de píxel en imágenes captadas por las tres diferentes cámaras en un instante CAD determinado aplicando colormap	35
3.12	Tabla resumen de aspectos a analizar y comparar	35
4.1	Curvas promedio para el combustible 100D	38
4.2	Imágenes de radiación de KL en el interior de la cámara de combustión	39
4.3	Imágenes de quimioluminiscencia de OH* en el interior de la cámara de combustión	40
4.4	Mapas radiales de radiación KL y OH* para el combustible 100D	41
4.5	Curvas promedio para la condición nominal	42
4.6	Imágenes de radiación de KL en el interior de la cámara de combustión (condición nominal)	43
4.7	Imágenes de quimioluminiscencia de OH* en el interior de la cámara de combustión (condición nominal)	44
4.8	Mapas radiales de radiación KL y OH* para la condición nominal	45
4.9	Curvas promedio para condiciones de baja concentración de oxígeno en la admisión	46
4.10	Imágenes de radiación de KL en el interior de la cámara de combustión	47
4.11	Imágenes de radiación de OH* en el interior de la cámara de combustión	48
A.1	Costes de personal	64
A.2	Costes de equipamiento	64
A.3	Presupuesto final	65

Índice de tablas

2.1	Evolución normas EURO de emisiones en vehículos turismos diésel [20]	13
3.1	Características del motor óptico	26
3.2	Condiciones de funcionamiento del motor	27
3.3	Condiciones de operación del motor óptico (simulación de EGR) [44]	28
3.4	Composición combustible OME _X empleado [44]	28
3.5	Comparación de propiedades combustibles diésel y OME _X [31]	29
3.6	Mezclas de combustible y proporciones	29

Capítulo 1

Introducción

1.1 Contexto actual

Debido a la evolución tecnológica y el crecimiento demográfico de la sociedad y economías emergentes, a lo largo de las últimas décadas se ha producido un enorme aumento del consumo de petróleo y más recursos energéticos fósiles [1]. El crecimiento de la demanda mundial de energía se acelera casi a diario para satisfacer las necesidades de la población humana, lo que ha dado lugar a una crisis energética y a un aumento de la contaminación ambiental. En la figura 1.1 y la figura 1.2 se muestra la evolución del consumo energético global en función de la fuente energética durante más de 200 años. Los combustibles fósiles siempre han sido la fuente dominante, siendo el petróleo la principal fuente energética a lo largo del tiempo, aunque las fuentes de energía renovables han adquirido más relevancia durante los últimos setenta años, coincidiendo con el mayor aumento de demanda energética.

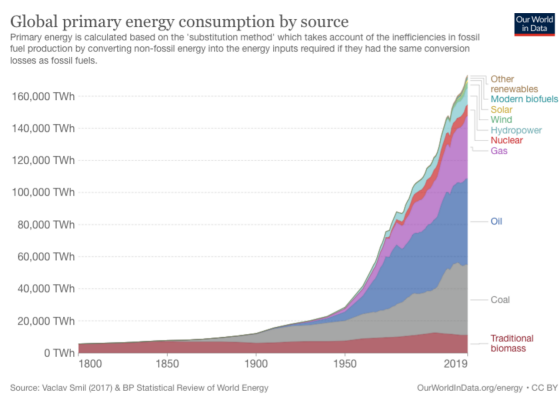


Figura 1.1: Evolución del consumo energético global primario en función de la fuente (acumulado) [2]

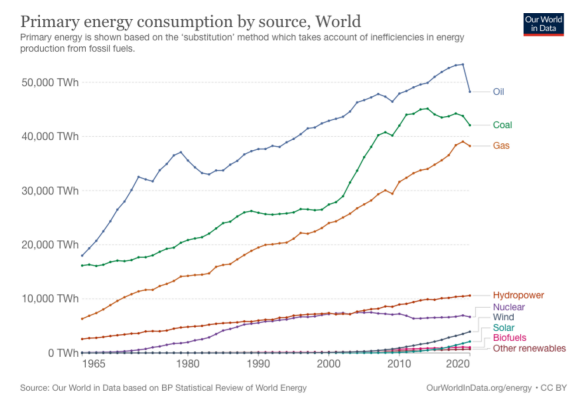


Figura 1.2: Evolución del consumo energético global primario en función de la fuente (individual) [2]

Los combustibles fósiles resultan insostenibles por tratarse de fuentes de energía agotables y por su enorme impacto ambiental. Uno de los problemas más importantes asociados a su uso es la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), que conduce al calentamiento global y crea problemas relacionados con el cambio climático [3]. A causa de esto, surge la necesidad

de buscar fuentes de energía alternativas ecológicas y sostenibles [4], aun así, las estimaciones de aquí a diez o veinte años indican que los combustibles fósiles continuarán dominando el mercado energético a nivel mundial [1]. En la figura 1.3 se muestra el desglose de las emisiones globales de gases de efecto invernadero en 2016. El 16.2% de las emisiones totales se debe al sector del transporte, donde se incluyen las emisiones directas de la quema de combustibles fósiles. Dentro de este sector, el porcentaje de interés para este trabajo es el correspondiente al transporte por carretera (11.9%), debido principalmente a la quema de gasolina y gasóleo de todos los coches, camiones, motocicletas y autobuses. Se puede deducir, por tanto, que, si fuésemos capaces descarbonizar por completo el sector del transporte por carretera, lograríamos reducir las emisiones globales de GEI en un 11.9%.

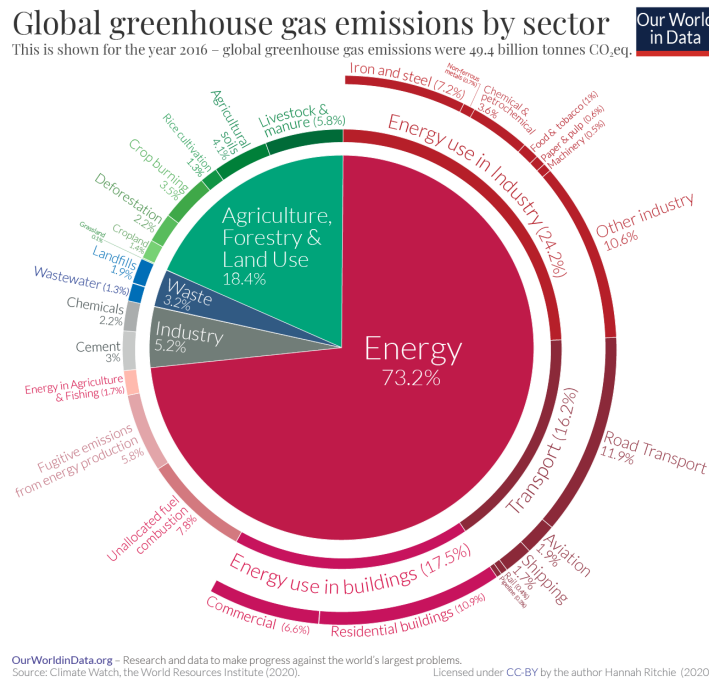


Figura 1.3: Emisiones globales de gas de efecto invernadero por sector [5]

En la figura 1.4 se pueden observar en detalle las emisiones de CO₂ debidas al sector del transporte durante el año 2018. Como se ha indicado anteriormente, la mayor contribución se debe al transporte por carretera, llegando a representar casi el 75% de las emisiones debidas a este sector.

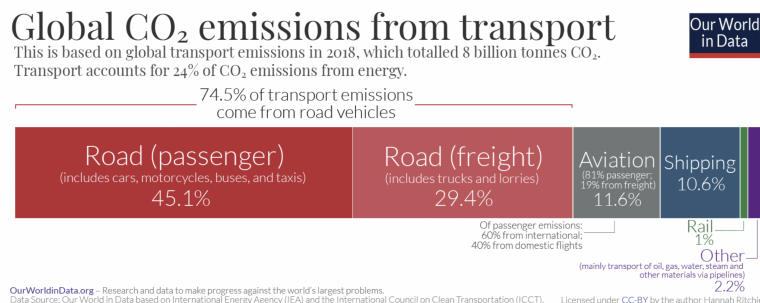


Figura 1.4: Emisiones globales de CO₂ del sector del transporte [2]

Por lo que respecta al motor de combustión interna, actualmente es el encargado de propulsar el 99.8% del transporte [6]. Reducir el consumo de combustible y las emisiones ha sido el objetivo de los investigadores y fabricantes de motores durante años, es más, se han realizado importantes avances que hacen del motor de combustión interna actual una maravilla tecnológica. Sin

embargo, la estricta legislación impuesta por los gobiernos en materia de emisiones ha impulsado la creación nuevas tecnologías para reemplazarlos, como son los motores eléctricos e híbridos, con el objetivo de reducir aún más el consumo de combustible y las emisiones [7]. Estos pueden llegar a ser muy eficientes, pero presentan ciertos problemas que los alejan de ser una solución definitiva a corto plazo, puesto que, para poder afirmar que no emitan contaminantes, la fuente de energía para la generación de la electricidad que consumen, así como la fabricación de las baterías, debe ser renovable. Como ya se ha comentado, los combustibles fósiles siguen siendo predominantes por encima de las fuentes de energía renovable, por lo que hoy en día no se garantizan las cero emisiones para un motor eléctrico.

Dicho esto, el futuro del transporte es incierto, pero se puede indicar que el motor de combustión interna todavía tiene mucha vida por delante, por lo que son necesarias soluciones tecnológicas para construir motores más limpios y eficientes. Como se verá en el apartado “Reducción de emisiones”, existen diferentes tecnologías y alternativas que ya se aplican en motores de encendido por compresión (MEC) y otras en desarrollo.

1.2 Objetivos y alcance del trabajo

Debido a los problemas que presentan los recursos energéticos fósiles ya expuestos, durante los últimos años se ha culpado de forma desproporcionada a los motores de combustión interna por el aumento de las emisiones de los GEI. Como ingenieros especializados en sistemas de propulsión, en este caso en el ámbito de la automoción, es nuestro deber evaluar de forma sincera el progreso llevado a cabo en el desarrollo de los motores de combustión interna durante las últimas décadas, así como el potencial de progreso futuro, teniendo en cuenta la madurez de desarrollo con la que cuenta esta tecnología y que muchas otras no. Del mismo modo, es necesaria la reflexión sobre los beneficios que ofrecen las novedosas (y no tan novedosas) tecnologías alternativas con el objetivo de dirigir las nuevas investigaciones, estudios y desarrollos hacia un futuro más sostenible. Por ello, este trabajo se ha planteado con el objetivo de analizar los resultados de ensayos realizados en el Centro de Motores Térmicos de la Universitat Politècnica de València en materia de reducción de emisiones de hollín en motor de encendido por compresión. Para ello, se parte de las mediciones realizadas en dichos ensayos, así como de la información registrada en formato vídeo, con objeto de sacar las conclusiones pertinentes empleando combustibles alternativos. En concreto, los principales objetivos de este trabajo se detallan a continuación:

- **Estudiar los fenómenos fisicoquímicos que ocurren durante el proceso de la combustión:** mediante la aplicación de técnicas ópticas, se han realizado ensayos que permiten describir de forma detallada el proceso de combustión y la morfología de la llama. Por tanto, se ha realizado un procedimiento de tratamiento de esta información que permita realizar un análisis de la misma.
- **Evaluar la formación de hollín para diferentes mezclas de combustibles:** se han empleado mezclas en diferentes proporciones de diésel convencional y OME_x con el objetivo de determinar la influencia de la presencia del *e-fuel* en la formación de hollín y los procesos de oxidación que tienen lugar durante la combustión.
- **Proponer estudios futuros:** finalmente, tras los resultados obtenidos, se propone una serie de estudios interesantes, así como una ampliación a las técnicas ópticas usadas en este trabajo.

De esta forma, se pretende colaborar participando en la continua investigación para reducir el impacto ambiental de los MCIA, centrándose el trabajo en los motores de encendido por compresión. Como ya se ha comentado, son necesarios desarrollos novedosos de tecnologías alternativas al motor de combustión actual con objeto de reducir, principalmente, las emisiones de GEI. De esta forma, el MCIA se afianzará como una tecnología más limpia, lo que le permitirá afrontar con perspectivas optimistas un futuro cercano preocupado por la sostenibilidad medioambiental. Teniendo esto en cuenta, es necesario mencionar algunos aspectos relacionados con el motor MCIA que impactan en ese futuro [7, 8]:

- Actualmente, la demanda de transporte es grande, creciente e impulsada por la combustión de derivados del petróleo.
- Todo el planeta está conectado por una infraestructura de transporte basada en el MCIA, la cual requeriría décadas y una gran inversión económica reemplazar.
- Se han logrado avances en los MCIA en las últimas décadas que han reducido de una forma drástica los niveles de contaminantes.
- Alternativas como los vehículos eléctricos que funcionan con baterías tienen un enorme costo y peso, entre otras limitaciones. Se pretende que funcionen con energías renovables, pero actualmente, como ya se ha visto, el consumo principal de energía global proviene de los combustibles fósiles.

Con todo esto, queda clara la necesidad de gestionar una transición realista hacia futuros sistemas energéticos sostenibles, por lo que se deben seguir explorando nuevas tecnologías de motores y combustibles competitivas. Es probable que próximamente el sector del transporte se caracterice por una combinación de soluciones que incluyan motores de combustión interna, eléctricos de batería y sistemas híbridos [7].

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 El motor de combustión interna alternativo de encendido por compresión

El pasado, el presente y el futuro del motor de encendido por compresión abarca más de 100 años, desde la época de Rudolf Diesel hasta los motores computarizados y altamente regulados del siglo XXI. El desarrollo de este tipo de motor hizo posible la existencia de máquinas económicas, fiables y de alta densidad energética, que permitieron una evolución más rápida y productiva de la industria, especialmente de los sectores del transporte, la construcción y la agricultura, disminuyendo el esfuerzo humano [9]. El objetivo de este apartado es realizar una revisión general de la tecnología del motor MEC, diferenciándolo del MEP, haciendo hincapié en aspectos como la formación de la mezcla, inyección de combustible y proceso de combustión. Finalmente, se entra en detalle en sus principales emisiones contaminantes.

2.1.1 *El motor de combustión interna alternativo*

Desde su aparición, los MCIA han dominado sin una competencia seria en un amplio campo de aplicaciones debido a las enormes ventajas que ofrecen frente a otros tipos de motores [10]. Algunas de ellas son:

- Rendimiento: En algunos motores el rendimiento global o efectivo máximo puede obtener valores del 55% referido a la energía disponible en el combustible, cifra realmente alta en comparación con otros motores, como los eléctricos o la turbina de gas, teniendo en cuenta las limitaciones termodinámicas.
- Potencia: Pueden suministrar un amplio rango de potencia, desde decenas de Vatios hasta varias decenas de Megavatios, lo que amplía su campo de aplicación.
- Combustibles: Pueden funcionar empleando combustibles de naturaleza diferente, tanto en fase líquida como gaseosa e incluso en fase sólida (si se encuentra finamente pulverizado), lo que facilita la utilización de combustibles alternativos.

- Características constructivas: Como unidad constructiva del MCIA, el conjunto cilindro-émbolo se puede construir en diferentes tamaños, con unidades características que van desde el centímetro hasta el metro (diámetro y carrera).

Sin embargo, como toda tecnología, los MCIA también presentan algunos inconvenientes, como son:

- La emisión de gases contaminantes.
- La limitación en la potencia máxima.
- La limitación en la potencia específica (potencia por peso del motor) máxima.
- La dependencia del petróleo para obtener combustible.

Como es conocido, existen diferentes formas de clasificar los MCIA. Para comenzar, es necesario diferenciar entre el motor de encendido provocado (MEP) y el motor de encendido por compresión (MEC), en el cual se centra este trabajo. La principal diferencia entre ambos es que el primero requiere una fuente externa que produzca una chispa para realizar la ignición de la combustión, mientras que el segundo no. En el motor de encendido por compresión la combustión se inicia gracias al autoencendido, que tiene lugar debido al aumento de temperatura en la cámara de combustión, causa del proceso de compresión. El combustible se inyecta hacia el final de la carrera de compresión cuando el aire alcanza niveles de temperatura lo suficientemente altos para producir el autoencendido [10]. Hay varias razones por las que los motores MEC son tan populares en aplicaciones comerciales e industriales. Entre ellas destaca, por un lado, que la eficiencia inherente al MEC es mayor que la del MEP. Esto se debe a varios factores [9]. Por un lado, los MEC ofrecen la posibilidad de llevar a cabo altas relaciones de compresión, lo cual está limitado en los MEP con el fin de evitar el fenómeno conocido como detonación. Por otro lado, en un MEC el combustible se inyecta y se mezcla directamente en la cámara de combustión, por lo que la potencia del motor se puede controlar simplemente ajustando la cantidad de combustible que se inyecta. En cambio, en el MEP el combustible y el aire se mezclan previamente de forma homogénea en una mezcla en proporciones constantes, por lo que, si se reduce la cantidad de combustible, es necesario también reducir la cantidad de aire proporcionalmente, lo que se consigue estrangulando o restringiendo la admisión. Esto genera importantes pérdidas de intercambio de gases, conocidas como pérdidas por “bombeo”. Sin embargo, también existen inconvenientes que se deben tener en cuenta en el motor MEC, entre los que destacan sus emisiones contaminantes. Durante el proceso de combustión existe una estratificación significativa entre el combustible y el aire, a diferencia de la homogeneidad de la mezcla en los MEP, lo que crea material residual en forma de partículas y óxidos de nitrógeno (NO_x). Estos productos no deseados de la combustión del MEC son un peligro para la salud y perjudiciales para el medio ambiente, lo que se verá más en detalle en la subsección 2.1.3. Dicho esto, se puede afirmar que el problema principal del motor MEC no es su eficiencia, sino sus emisiones [9].

Motores de cuatro tiempos

El ciclo de trabajo de los motores de cuatro tiempos se completa en cuatro carreras del pistón, es decir, dos vueltas de cigüeñal. Normalmente, los procesos que tienen lugar durante el ciclo son los siguientes (figura 2.1):

1. Admisión (1^a carrera): válvulas de admisión abiertas y de escape cerradas. El pistón se desplaza desde el PMS hacia el PMI generando una depresión en el interior del cilindro que induce la entrada de gases (normalmente aire en un MEC) a través del conducto de admisión. Cuando el pistón llega al PMI, las válvulas de admisión se cierran.

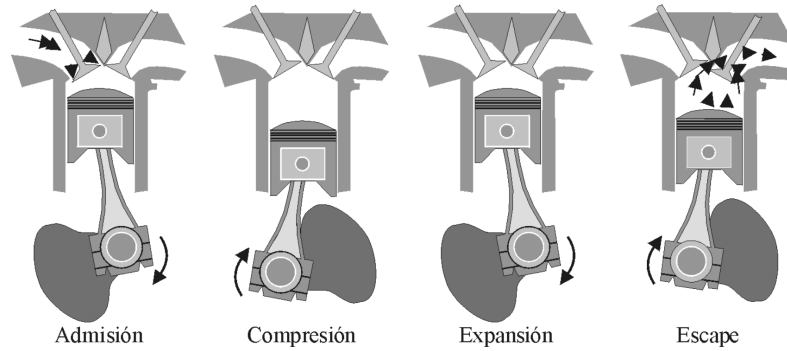


Figura 2.1: Fases de un motor 4T

2. Compresión (2^a carrera): válvulas de admisión y escape cerradas. El pistón se desplaza desde el PMI hacia el PMS comprimiendo el fluido contenido en el cilindro. Cuando el pistón se encuentra cerca del PMS se inyecta el combustible, produciéndose la combustión.
3. Expansión (3^a carrera): la combustión, principalmente, produce un aumento de presión en los gases contenidos en el cilindro, empujando el pistón que se desplaza del PMS hacia el PMI y obteniendo trabajo de este desplazamiento.
4. Escape (4^a carrera): válvula de admisión cerrada y válvula de escape abierta. El pistón se desplaza desde el PMI hacia el PMS expulsando los gases quemados hacia el exterior del cilindro. Al llegar el pistón al PMS se cierra la válvula de escape.

Normalmente, debido a la compresibilidad del aire y la imposibilidad de realizar la combustión a volumen constante, se realizan modificaciones en los instantes de apertura y cierre de las válvulas de admisión, así como de ignición de la combustión, para que no coincidan exactamente con los PMS y PMI. Estas modificaciones se conocen como adelantos y retrasos respecto a esos puntos:

- **AAA** (Avance en la apertura de admisión): ángulo girado por el cigüeñal desde el inicio de la apertura de la válvula de admisión hasta el PMS.
- **RCA** (Retraso en el cierre de admisión): ángulo girado por el cigüeñal desde el PMI hasta que se cierra la válvula de admisión.
- **AAE** (Avance en la apertura de escape): ángulo girado por el cigüeñal desde el inicio de la apertura de la válvula de escape hasta el PMI.
- **RCE** (Retraso en el cierre del escape): ángulo girado por el cigüeñal desde el PMS hasta que se cierra la válvula de escape.
- **AI** (Avance a la inyección): ángulo girado por el cigüeñal desde el inicio de la inyección de combustible hasta que el pistón se encuentra en el PMS.

Se conoce como ángulo de cruce de válvulas al ángulo durante el que permanecen abiertas simultáneamente las válvulas de admisión y escape y es la suma de los valores del AAA y el RCE. La forma de representar estos ángulos es mediante el uso de diagramas de distribución como el de la figura 2.2. El valor óptimo de estos ángulos depende de las condiciones de operación del motor, principalmente del régimen de giro, así como de las características constructivas (número de cilindros y disposiciones y dimensiones de los colectores de admisión).

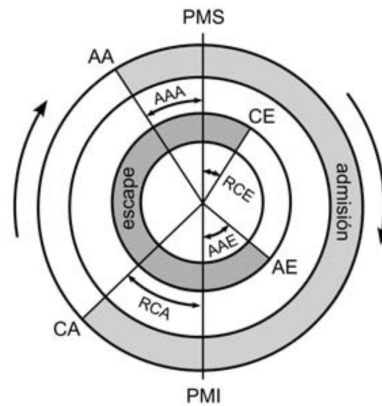


Figura 2.2: Diagrama de distribución de un motor 4T

Existen otras clasificaciones interesantes de los MCIA, como son en función de la presión de admisión, del tipo de refrigeración o el número y disposición de cilindros [10].

2.1.2 Proceso de combustión en MEC

En los motores de encendido por compresión la mezcla aire-combustible es fundamentalmente heterogénea y la combustión se produce en zonas en que las condiciones termodinámicas son las adecuadas, especialmente donde el dosado local se acerca al estequiométrico, por autoencendido. Por tanto, la combustión no se produce en una zona definida, sino que aparecen frentes de llama que evolucionan en función del chorro de combustible inyectado y el movimiento del aire en la cámara de combustión. El proceso de combustión depende espacial y temporalmente del proceso de inyección y está controlado por el desarrollo de los procesos físicos que tienen lugar en el seno del chorro de combustible [10].

Formación de la mezcla

La formación de la mezcla está dominada principalmente por el proceso de inyección, además de por el movimiento del aire en la cámara de combustión y del puerto de admisión. Teniendo en cuenta que la formación de la mezcla es interna y que la inyección directa de combustible en la cámara de combustión tiene lugar unos grados de cigüeñal antes de iniciar la combustión, se producen diferentes gradientes de aire/combustible, que también generan gradientes de temperatura. Las regiones en el centro del chorro suelen ser muy ricas en combustible y en la periferia de este encontramos todo lo contrario: aire puro. Debido al poco tiempo disponible para completar la evaporación y la formación de la mezcla, es inevitable que en las zonas ricas se forme hollín [11]. Por su parte, el sistema de inyección debe generar la presión de inyección requerida, dosificar el combustible y asegurar la propagación del chorro, así como garantizar una rápida disolución del mismo, formar gotas y mezclar el combustible con el aire de combustión [12]. Durante este proceso, ocurren dos fenómenos principales:

ATOMIZACIÓN:

Comienza al inyectar el combustible en fase líquida a alta presión dentro de la cámara de combustión. Este proceso está formado por lo que se conoce como *primary breakup* (atomización primaria) y *secondary breakup* (atomización secundaria) [10]. Durante el *primary breakup* el líquido inyectado se convierte en una nube de gotitas debido al aumento de la interacción entre el combustible y el aire. Como consecuencia de inestabilidades inerciales, turbulencias y cavitación, entre otros fenómenos, se producen deformaciones en la fase líquida, dando lugar

a gotas relativamente grandes. Durante el *secondary breakup* estas gotas, que pueden ser inestables, se fragmentan en gotitas más pequeñas repetidamente hasta volverse estables. En esta fase, a medida que la presión de inyección aumenta, no solo llega más aire al chorro, sino que el diámetro de las gotas también se hace más pequeño [12]. En la figura 2.3 se muestra un esquema de un chorro de líquido que se rompe en filamentos y gotitas de líquido.

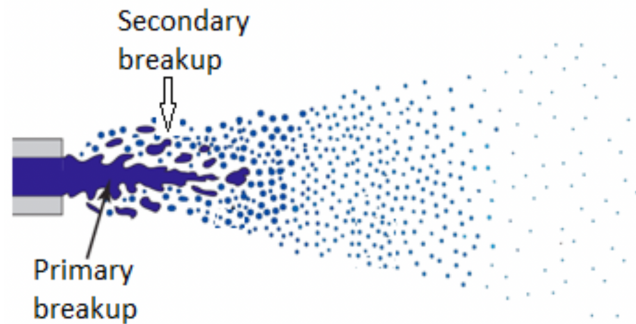


Figura 2.3: Esquema de atomización primaria y secundaria del chorro de combustible [13]

EVAPORACIÓN:

La evaporación del combustible juega un papel importante tanto en el proceso de combustión como en la formación de emisiones contaminantes. Una vez atomizado el chorro, las microgotas se encuentran rodeadas de aire caliente, intensificándose la transferencia de calor del aire a las gotas. Este proceso está influenciado fundamentalmente por la energía cinética de la pulverización de combustible y, a su vez, por la presión de inyección [12]. Una elevada velocidad relativa entre las microgotas y el aire favorece el transporte de masa y la transferencia de calor, aumentando la temperatura de las gotas, su presión de vapor y la cantidad de combustible evaporado. Durante este proceso, las gotas disminuyen su tamaño continuamente hasta que se evaporan por completo [11].

El proceso de combustión en los MEC está constituido por una combinación de combustión premezclada y por difusión, siendo esta última la dominante, excepto para cargas muy bajas. Mediante la medición directa de la presión en el cilindro en función del grado de giro del cigüeñal se puede representar la tasa de liberación de calor (RoHR). Teniendo esto en cuenta, así como el inicio de inyección (SOI), el proceso de combustión en un MEC se divide en tres etapas (ver figura 2.4) [14]:

Retardo de encendido

El tiempo que transcurre entre el SOI y el inicio de la combustión (SOC) es un parámetro determinante para la eficiencia y las emisiones contaminantes [12]. Durante esta fase ocurren diferentes procesos físicos y químicos: tienen lugar los procesos de atomización y evaporación, se producen las reacciones previas y se crean las condiciones adecuadas para que ocurra autoencendido.

Combustión premezclada

Cuando la mezcla de aire y combustible está dentro de sus límites de inflamabilidad [14], se quema rápidamente todo el combustible inyectado que ha formado una mezcla inflamable con el aire durante el tiempo de retardo, lo que da lugar a una combustión a alta temperatura y una rápida e intensa liberación de calor, marcada por el pico más alto en la figura 2.4. Se forman precursores del hollín y especies finales como el CO_2 y H_2O . Además, cuanto mayor es el pico RoHR, mayor será la temperatura y, por tanto, la formación de NO_x , que se relaciona con la cantidad de combustible quemado durante esta fase [11].

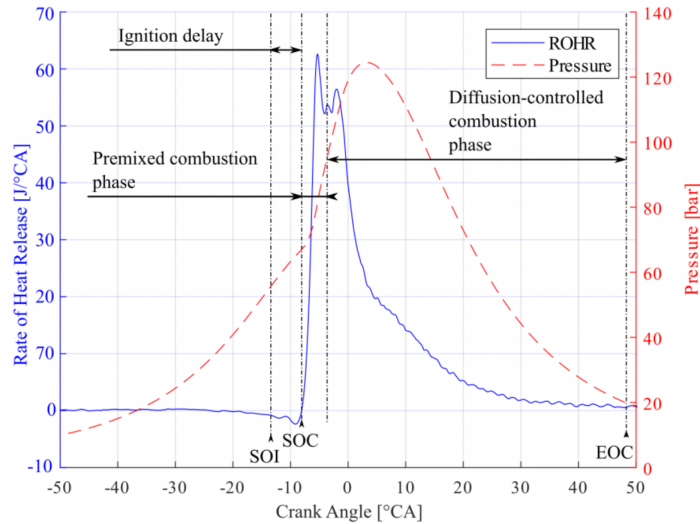


Figura 2.4: Fases de la combustión en un motor MEC [14]

Combustión por difusión

Ocurre cuando la premezcla se ha quemado completamente, iniciando lo que se conoce como proceso de mezcla controlada. La tasa de liberación de calor está controlada por la tasa en la que el combustible y el comburente se mezclan en porciones apropiadas para la combustión [11]. Durante esta fase, la tasa de liberación de calor está controlado principalmente por el proceso de mezcla de vapor de aire y combustible. Dependiendo de la cantidad de combustible inyectado y de la duración del período de retardo del encendido, el valor máximo de RoHR de la combustión por difusión puede ser menor o mayor que el de la fase de combustión premezclada [14]. Mientras dura la inyección, el proceso de mezcla está controlado por la cantidad de movimiento que introduce el chorro en la cámara. El frente de llama se establece y es sostenido por el transporte convectivo y difusivo de combustible y oxígeno hasta el final del proceso de inyección, momento en el cual cesa el aporte de cantidad de movimiento del chorro para el proceso de mezcla. Una vez finalizada la inyección, el proceso de difusión cobra mayor relevancia. A partir de aquí, la tasa de combustión cae y el fenómeno de oxidación está controlado por la turbulencia que queda en la cámara de combustión gracias al movimiento del aire o al movimiento residual del chorro hasta que se consume el combustible presente en la cámara [10]. Durante esta fase, el NO_x formado previamente apenas se reduce (ver figura 2.5) [12].

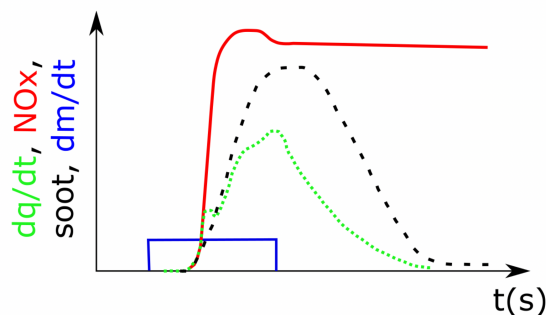


Figura 2.5: Concentraciones de NO_x y hollín en la cámara de combustión en función del CAD [12]

El hollín se forma en zonas de mezcla rica con temperaturas superiores a 1600K [11], principalmente en el núcleo del chorro de combustible y en las paredes del *bowl* del pistón. Una elevada formación de hollín implica una mala combustión y baja eficiencia en el motor, además, las emisiones de hollín se consideran extremadamente dañinas para la salud humana y el medio

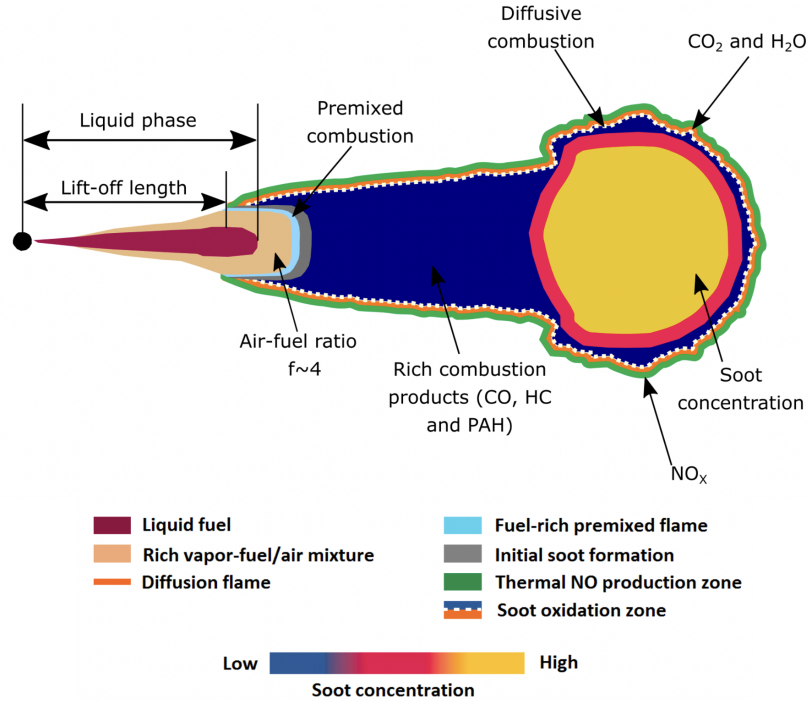


Figura 2.6: Esquema modelo de llama en motor diésel [15]

ambiente. En los motores actuales, la mayor parte del hollín formado se oxida durante la carrera de expansión. En la figura 2.6 se representa el modelo de llama en motor Diesel propuesto en [15]. La distancia desde la salida de la boquilla hasta la punta de la región líquida se conoce como longitud de *lift-of* (LOL). Es un parámetro importante en el proceso de combustión de los motores. Una LOL más larga podría generar un impacto dentro de la taza del pistón y conduce a una mayor formación de emisiones [12]. La estructura de llama de difusión se forma en la zona azul, donde el volumen interno consta de productos de combustión intermedia, combustible no quemado y precursores de hollín. El frente de llama de difusión (naranja) está formado por una superficie estequiométrica con una gran cantidad de oxígeno disponible, por lo que los productos parciales de la combustión se oxidan cuando lo alcanzan. En esta zona se libera la mayor parte de la energía química del combustible y la existencia de oxígeno en la región exterior del spray (verde) provoca mezclas pobres y altas temperaturas, lo que favorece la formación de NO_x [11].

2.1.3 Formación de hollín

El hollín se puede considerar como una sustancia sólida, compuesta principalmente por carbono [11], que se forma a partir del combustible no quemado cuando pasa de fase de vapor a fase sólida en regiones ricas en combustible a temperaturas elevadas. Los hidrocarburos u otras moléculas disponibles pueden condensarse o ser absorbidos por el hollín, según las condiciones del entorno [16]. La evolución de los hidrocarburos en fase líquida o de vapor a partículas sólidas de hollín y posiblemente de regreso a productos en fase gaseosa involucra seis procesos comúnmente identificados: pirólisis, nucleación, crecimiento superficial, coalescencia, aglomeración y oxidación. Los cinco primeros procesos constituyen el proceso de formación de hollín, como se muestra en la figura 2.7. En cambio, la oxidación puede ocurrir en cualquier momento, transformando los hidrocarburos en CO , CO_2 y H_2O . Durante el proceso de pirólisis se modifica la estructura molecular de los compuestos orgánicos en condiciones de alta temperatura y se

producen algunas especies que posteriormente formarán precursores del hollín (hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), poliacetilenos, hidrocarburos insaturados y acetileno). Durante la nucleación se forman las partículas de hollín. Este proceso requiere temperaturas entre 1300 y 1600K y tiene lugar en las regiones ricas en radicales. Posteriormente, tiene lugar el crecimiento superficial. Durante esta fase, se agrega masa a la superficie de la partícula de hollín. Finalmente, durante la coalescencia y la aglomeración, las partículas se combinan: durante la coalescencia, las partículas chocan, reduciéndose en número, pero manteniendo la masa y, posteriormente, durante la aglomeración, se unen y forman grandes grupos de partículas [16].

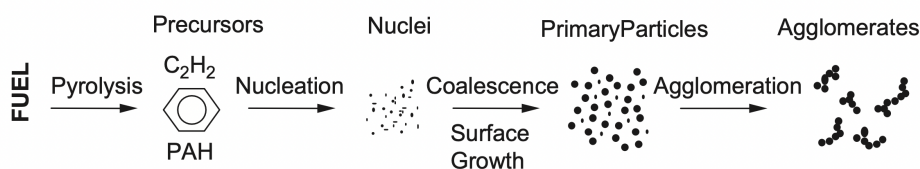


Figura 2.7: Proceso de formación de hollín [16]

Por otro lado, respecto al resto de emisiones contaminantes, como se puede observar en la figura 2.8, los óxidos de nitrógeno se forman en las zonas con exceso de aire y altas temperaturas. Los hidrocarburos inquemados, por su parte, se deben a las bajas temperaturas en las zonas pobres de la llama, que impiden la oxidación completa.

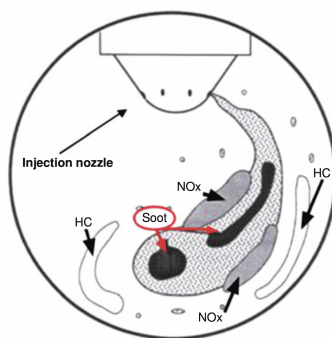


Figura 2.8: Producción de contaminantes en una cámara de combustión con mezcla heterogénea [12]

2.2 Estrategias de reducción de emisiones contaminantes

2.2.1 Normativa/Regulación actual

A finales de la década de 1980, los países de la Unión Europea (UE) comenzaron a mostrar su preocupación por las emisiones de CO_2 de los coches, gestándose en 1987 la primera norma EURO: la EURO 0, publicada en 1988. Actualmente, con el objetivo de reducir las emisiones contaminantes de los automóviles, la normativa europea se ha endurecido, siendo cada vez más estricta y restrictiva [17]. La UE cuenta con un ambicioso marco legislativo para reducir las emisiones contaminantes de los vehículos turismos y vehículos pesados. Las normas EURO constituyen el conjunto de requisitos y condiciones que regulan los límites admisibles de emisiones de gases de combustión en los vehículos nuevos vendidos en los estados miembros. Desde su aparición, se han ido aprobando consecutivas normas EURO, cada vez más restrictivas, para las emisiones de partículas (PM), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC) sin quemar y monóxido de carbono (CO) [18].

Actualmente, está vigente la norma EURO 6, la norma más estricta hasta la fecha, que considera diferentes límites de emisiones para los vehículos de gasolina y diésel [19]. En la tabla 2.1 se muestra la evolución de los límites marcados por la normativa EURO desde su aparición hasta la actualidad para los vehículos turismos diésel. Se puede observar una reducción progresiva de los límites impuestos, resultado de un compromiso entre la UE y el sector de la automoción para reducir las emisiones contaminantes y mejorar la calidad del aire. Se puede comprobar cómo en 1992 un turismo diésel podía emitir hasta 140 miligramos de PM por kilómetro, mientras que en 2014 esta cifra se redujo hasta 5 miligramos, así como las emisiones de NO_x se redujeron de 500 a 80 miligramos por kilómetro del año 2000 al 2014. Como se observa, para los turismos diésel, a partir de septiembre de 2018 las partículas en suspensión han empezado a medirse en número de partículas por kilómetro recorrido, lo que muestra una notable disminución de sus emisiones.

Tabla 2.1: Evolución normas EURO de emisiones en vehículos turismos diésel [20]

Norma	Fecha	CO [g/km]	HC [g/km]	HC+ NO_x [g/km]	NO_x [g/km]	PM [g/km]
EURO 1	Julio de 1992	2.72	-	0.97	-	0.14
EURO 2, IDI	Enero de 1996	1.0	-	0.7	-	0.08
EURO 2, DI	Enero de 1996	1.0	-	0.9	-	0.10
EURO 3	Enero de 2000	0.64	-	0.56	0.5	0.05
EURO 4	Enero de 2005	0.5	-	0.30	0.25	0.025
EURO 5	Septiembre de 2009	0.5	-	0.23	0.18	0.005
EURO 6	Septiembre de 2014	0.5	-	0.17	0.08	0.005
EURO 6c	Septiembre de 2018	0.15	0.015	0.02	0.015	1E-11 [# /km]
EURO 6d-TEMP-EVAP-ISC	Septiembre de 2019	Controles evaporativos (EVAP)+Controles de emisiones a coches en circulación (ISC)				
EURO 6d-ISC	Enero de 2020	Controles de emisiones a coches en circulación (ISC)				
EURO 6d-ISC-FCM	Enero de 2021	Supervisión del consumo de combustible (FCM)				

Gracias a estas medidas legislativas, junto a las mejoras tecnológicas, en los últimos años se han favorecido el desarrollo y la fabricación de vehículos más respetuosos con el medio ambiente [18]. En la figura 2.9 se representa de una forma más visual la evolución de los límites impuestos por las normas EURO de vehículos ligeros, gasolina y diésel, para diferentes emisiones contaminantes desde su aparición hasta 2017, y se puede observar una notable disminución para cada una de ellas.

Un vehículo, antes de comercializarse en el mercado europeo, tiene que pasar por un proceso de homologación. Por lo que respecta a las pruebas de laboratorio, hasta hace poco se probaban los vehículos mediante el nuevo ciclo de conducción europea (NEDC), desarrollado en los años 80, pero tras quedarse obsoleto debido a los avances tecnológicos y los cambios en las condiciones de conducción, los organismos reguladores de la ONU y la UE desarrollaron el procedimiento mundial armonizado para el ensayo de vehículo ligero (WLTP) [18]. Investigaciones realizadas en los últimos años han demostrado que las emisiones contaminantes y el consumo de los vehículos diésel en el mundo real suelen superar los niveles alcanzados en los procesos de homologación. Gracias a la prueba de emisiones en conducción real (RDE) creada por la UE, un coche nuevo se prueba en carretera a diferentes condiciones de operación (diferentes altitudes, velocidades, pendientes, cargas y temperaturas ambiente), cubriendo más del 90% de los hábitos y condiciones de conducción en Europa [18]. Por tanto, actualmente los nuevos vehículos se prueban empleando el ciclo de prueba WLTP en el laboratorio y complementando este con la prueba RDE en carretera.

De cara a 2025 se prevé la llegada de la norma EURO 7, centrándose más si cabe en las emisiones de NO_x , CO, HC inquemados y PM. El principal objetivo es reducir las emisiones de algunos contaminantes entre un 60% y un 90% y acabar con otras como las emisiones de

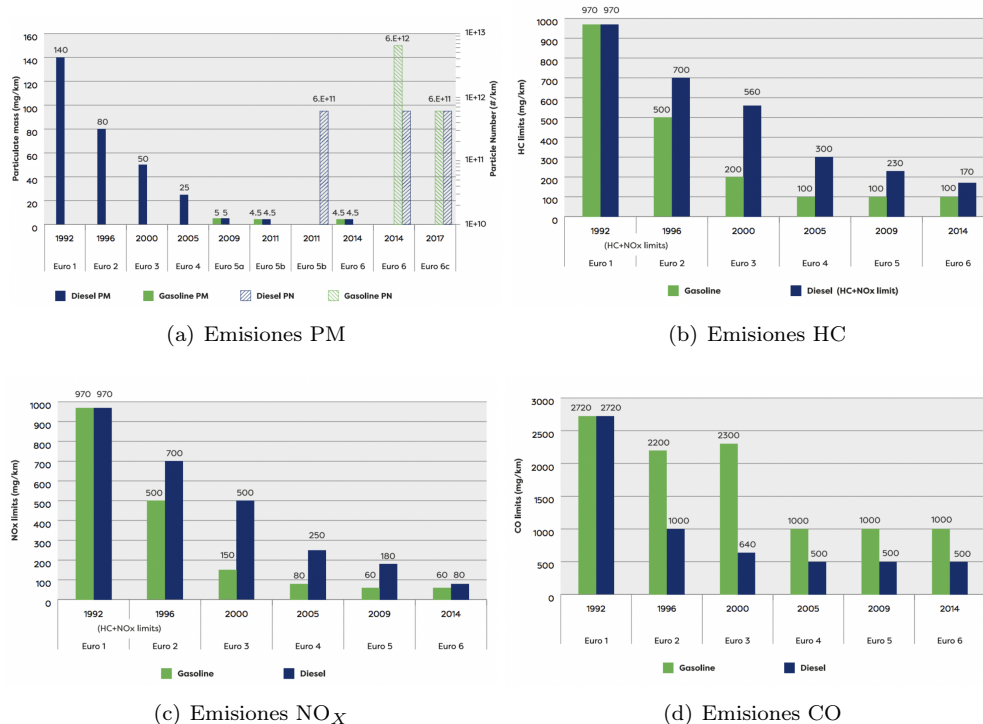


Figura 2.9: Evolución de los límites europeos de emisiones de vehículos ligeros [21]

amoníaco, metano y óxido nítrico. En este contexto, una posibilidad que se baraja es la de equipar los coches nuevos con un sistema de diagnóstico integrado que analice las emisiones en todo momento y en tiempo real, además de catalizadores, filtros de partículas y sistemas SCR más potentes [20].

2.2.2 Técnicas para reducir emisiones contaminantes

Las técnicas para reducir las emisiones de los motores de combustión interna son principalmente de dos tipos [10]:

- Soluciones activas que afectan al diseño del motor y sus componentes.
- Soluciones pasivas que tratan de reducir las emisiones contaminantes a la salida del motor antes de depositarlas en la atmósfera empleando sistemas de postratamiento de gases de escape.

A estas dos se añade el uso de combustibles alternativos, que se continúan investigando actualmente y son objeto principal de este trabajo. En la figura 2.10 se puede observar cómo los procesos de formación de NO_x y hollín en los motores de encendido por compresión muestran una tendencia opuesta [22]. Esta curva, conocida como curva de *trade-off*, representa la tendencia normal de diseño entre partículas y NO_x. Es necesaria la combinación de distintas modificaciones en el diseño del motor o diferentes sistemas de postratamiento en el escape para reducir las emisiones de ambos contaminantes. Por ejemplo, la mayoría de sistemas modernos utilizan múltiples estrategias de inyección para controlar tanto el NO_x como la tasa de formación de hollín [22]. Con el objetivo de reducir estas emisiones, la mayoría de las soluciones se dirigen a reducir temperaturas de llama, modificar tiempos de residencia y optimizar la for-

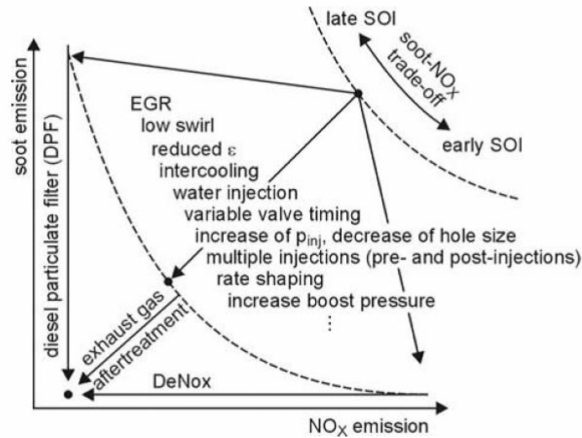


Figura 2.10: Curva de *trade-off* de formación de hollín y NO_x en motores Diésel [22]

mación del chorro de inyección en la cámara de combustión [10]. Este trabajo se centra en la reducción de emisiones contaminantes en el cilindro, por lo que los sistemas de postratamiento únicamente se mencionan de forma superficial. Entre las técnicas para reducir emisiones contaminantes en el cilindro se destacan las siguientes:

Cámara de combustión

Las prestaciones y emisiones alcanzables en un motor vienen determinadas por la combinación del diseño del *bowl*, la geometría de los conductos de admisión y las características del sistema de inyección. Si el chorro de combustible impacta contra el *bowl* demasiado pronto, las emisiones de humos aumentarán considerablemente. El instante de impacto depende de la distancia libre entre inyector y pistón, la presión de inyección, el diámetro de los orificios del inyector, la densidad del aire en la cámara y el movimiento del aire. Numerosos estudios han analizado la influencia de la geometría del *bowl* del pistón en el proceso de combustión y las emisiones de NO_x y hollín, proponiendo novedosos diseños [23, 24].

Sistema de inyección

Actuar sobre el chorro implica actuar sobre el proceso de combustión. Por ejemplo, aumentar la presión favorece una atomización más fina, que mejora los procesos de evaporación y mezcla y acelera la combustión, disminuyendo la formación de hollín, aunque aumentando las emisiones de NO_x [10]. Existen leyes de inyección escalonadas y sistemas con inyecciones múltiples, que pretenden reducir la cantidad de combustible introducido en el tiempo de retraso, reduciendo el calor liberado en la parte premezclada y desplazando la curva de *trade-off* de NO_x -PM hacia el origen.

Recirculación de gases de escape (EGR)

Se trata de una buena solución para reducir las emisiones de NO_x , pero produce un aumento de las emisiones de PM y HC, principalmente a elevados grados de carga, por lo que se suele aplicar a grados de carga bajos o medios. Es importante considerar que el paso de gases residuales por el sistema de admisión también provoca un aumento de su ensuciamiento.

Combustión a baja temperatura

Bajar la temperatura de llama siempre se traduce en una reducción de emisiones de NO_x , pero esto puede generar un incremento de las de HC. En la figura 2.11 se muestran las zonas de trabajo locales que favorecen la formación de NO_x y de hollín, que deben ser evitadas en la medida de lo posible en el desarrollo de la combustión. La combustión a baja temperatura (LTC), que se basa en aumentar la cantidad de combustible que se quema en la etapa premezclada, evita la formación de hollín y, con altas tasas de EGR, mantiene la temperatura máxima

fuera de la región de alta formación de NO_X . Para reducir la tasa de formación de NO_X es necesario que las temperaturas locales no superen los 2000 K [22].

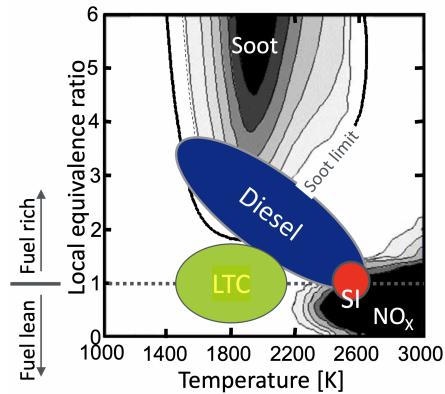


Figura 2.11: Zonas de emisiones de NO_X y hollín en gráfica temperatura local-dosado local [25]

Por otro lado, entre los sistemas de postratamiento eficientes, destacan diferentes dispositivos como catalizadores (DOC), sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR) y filtros de partículas (DPF), donde el precio de las materias primas es elevado [10]. Finalmente, los combustibles renovables se han considerado una alternativa con potencial para la futura sustitución del combustible fósil, así como para la reducción de emisiones contaminantes. Entre estos combustibles renovables, los *e-fuels* han demostrado un gran potencial para reducir tanto la formación de contaminantes en los cilindros, como la dependencia actual de los combustibles fósiles [26, 27]. En la sección 2.3 se entra en detalle en este tipo de combustibles y, en concreto, se analiza el OME_X , de principal interés para el análisis que se lleva a cabo en este trabajo.

2.3 Combustibles

Los dos principales combustibles desarrollados y utilizados ampliamente junto con el desarrollo de los MCIAs y las industrias automotrices son la gasolina y el diésel. A pesar de haber sido suministrados de forma estable durante mucho tiempo, estableciéndose como los combustibles estándar en el mercado automotriz, en la década de 1980 surgió la necesidad de la búsqueda de combustibles alternativos, como se ha comentado en la sección 1.1. Se definen como combustibles alternativos todos aquellos distintos a las gasolinas y gasóleos convencionales, por lo que existe una amplia variedad en función de sus fuentes y métodos de producción. La importancia del uso de combustibles alternativos se atribuye a los siguientes aspectos [28]:

1. Buscar la sostenibilidad energética a través de su uso extendido, siempre que sean derivados de fuentes de energía renovable.
2. Mejorar la eficiencia del motor y las emisiones contaminantes gracias a mejores propiedades del combustible frente al combustible convencional.
3. Equilibrar el uso de combustibles fósiles convencionales.

Para considerar combustibles alternativos en MCIAs, hay ciertos factores que hay que tener en cuenta [28]:

- **Propiedades de combustión:** el número de cetano impulsa el proceso de evolución de la combustión en los motores de combustión interna.
- **Propiedades físicas:** la formación de la mezcla también depende de propiedades físicas del combustible como la densidad y la viscosidad.
- **Poder calorífico inferior (PCI):** valores bajos del PCI pueden influir directamente en el consumo de combustible.
- **Compatibilidad:** la utilización pura de combustibles alternativos en el hardware y las tecnologías del sistema de inyección actuales determinan si un este tiene potencial para reemplazar el gasóleo convencional.
- **Coste de fabricación e infraestructuras para su suministro:** el costo que implican las modificaciones necesarias del motor impiden la irrupción de los combustibles alternativos en el mercado automotriz. Además, su costo de producción debe ser competitivo con el diésel convencional.

Respecto al caso que nos ocupa, el consumo de diésel es responsable de una grave contaminación del aire, incluyendo emisiones de óxidos de nitrógeno, hidrocarburos sin quemar, monóxido de carbono y partículas, como ya se ha indicado. En la figura 2.12 se representa la demanda mundial prevista de combustibles para el sector del transporte hasta 2040 y se puede observar cómo, a medida que esta aumente, se espera que también lo haga la proporción de combustibles alternativos, disminuyendo la proporción de uso de gasolina [28]. Actualmente, existe una gran

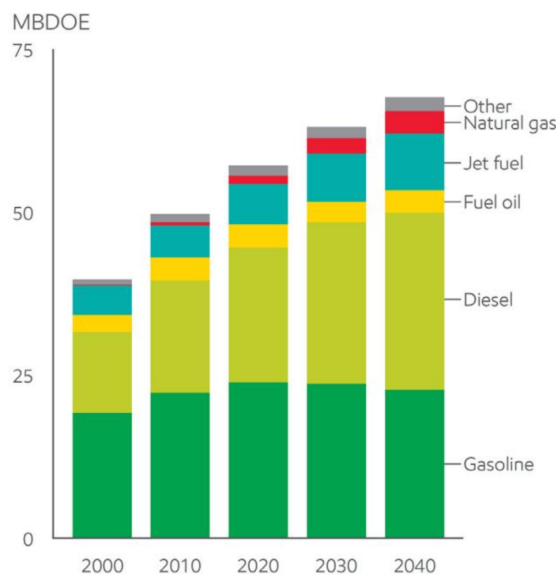


Figura 2.12: Demanda de combustible global en el sector del transporte [28]

variedad de combustibles alternativos con potencial para ser utilizados en motores diésel [29]. Entre ellos, los biocombustibles y los *e-fuels* se han considerado como alternativas prometedoras para lograr una combustión más limpia y reducir la dependencia del diésel fósil. Por un lado, los biocombustibles se producen a partir de la biomasa o materia orgánica, mientras que, por otro lado, los *e-fuels* son combustibles sintéticos que se producen utilizando energía renovable [30]. Entre los biocombustibles con potencial para usar en motores MEC destacan el biodiésel, que es el más extendido en el mercado actual, y el aceite vegetal hidrotratado (HVO), que puede considerarse un buen candidato para el reemplazo directo del diésel convencional por su

reducción en emisiones de CO_2 *WTW* (*well-to-wheel*) [31]. Los *e-fuels*, por su parte, también se consideran una alternativa con potencial para conseguir cero emisiones netas de CO_2 [11]. En general, estos se fabrican a partir de hidrógeno verde, el cual a su vez se obtiene mediante el uso de energía renovable y electrólisis; o de hidrógeno azul, mediante el reformado de metano con vapor (*SMR*) utilizando gas natural. Mediante su combinación con CO_2 se puede obtener el gas de síntesis o metanol. Este se oxida parcialmente a formaldehído, que posteriormente reacciona con el metanol residual obteniendo el OME_X [32].

2.3.1 Oxymethylene dimetil ether (OME_X)

El *oxymethylene dimetil ether* (OME_X) es un combustible sintético cuya estructura química está formada por un $\text{CH}_3\text{-O-(CH}_2\text{-O)}_X\text{-CH}_3$, donde la x , que se encuentra en el rango de valores 1-6, hace referencia a las unidades de *oxymethylen* y determina el tamaño molecular y las propiedades del combustible [33]. Este combustible se puede producir fácilmente, como se ha comentado, a través de sinterizado de metanol, con un coste energético relativamente bajo, reduciendo las emisiones de GEI *WTW* gracias a la captura de carbono y una fuente de energía limpia [34]. En la figura 2.13 se muestran las diferentes formas de producir y utilizar el metanol en los procesos de síntesis del OME_X . Existen diferentes combinaciones de reactivos para sintetizar el OME_X . Mediante un proceso de oxi-deshidrogenación del metanol se produce el formaldehído, que posteriormente se emplea para producir trioxano (TRI) o paraformaldehído (PF). Procesos más actuales requieren menos pasos y reactivos más simples como el dimetil éter (DME) o el formaldehído acuoso. Los principales costes del proceso de síntesis del OME_X son del 60% para la obtención de la materia prima y del 20% para el consumo de energía y, a pesar de que existe bastante literatura sobre estos procesos, sigue siendo necesaria la investigación sobre su escalado a procesos continuos de gran tamaño [35].

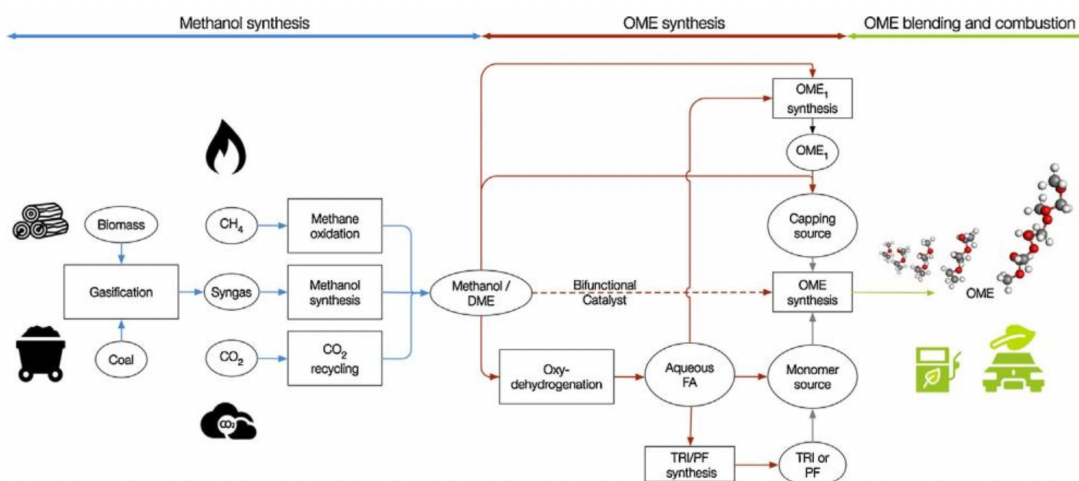


Figura 2.13: Rutas de síntesis en fase líquida de OME_X a través de metanol derivado de diversas fuentes. TRI: trioxano, PF: paraformaldehído, FA: formaldehído, DME: éter dimetilíco [35]

El proceso de combustión del OME_X no emite prácticamente hollín debido a la ausencia de enlaces C-C y la abundancia de átomos de oxígeno. Para valores de x entre 3 y 5, las estructuras químicas del OME_X tienen características más similares al diésel, por lo que resultan las más adecuadas para los sistemas de inyección actuales [35]. Existen diferentes estudios que evidencian la notable disminución de emisiones de hollín empleando mezclas de OME_X y diésel (*dual-fuel*) en motor óptico frente al diésel puro [26, 31, 36, 37]. Además, los precursores del hollín son degradados por los radicales hidroxilos que se forman durante la combustión del OME_X [35]. Esta reducción de hollín permite elevar las tasas de EGR para reducir las emisiones de NO_X evitando el *trade-off* entre NO_X y hollín, desacoplando la formación de estos contami-

antes y haciendo posible la reducción de sus emisiones simultáneamente de forma más sencilla [34, 38, 37]. En la figura 2.14 se muestra la diferencia en el *trade-off* entre NO_x y hollín para el diésel puro y para el OME_X puro, evidenciando esta posibilidad de reducir ambas emisiones más fácilmente.

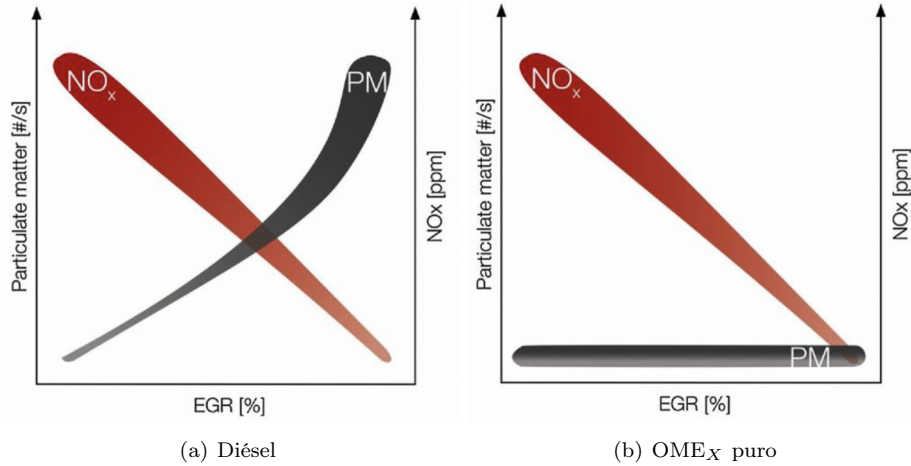


Figura 2.14: Representación esquemática de formación de partículas y NO_x frente a la tasa de EGR en un MEC para la combustión de (a) diésel y (b) OME_X puro [35]

Otra ventaja del OME_X es que se considera no tóxico, por lo que su aceptación social y política a largo plazo no debería suponer ningún inconveniente. Sin embargo, existen serios problemas de compatibilidad con los materiales generalmente utilizados en los motores para juntas y sellos cuando este *e-fuel* se utiliza puro. En general, el uso de OME_X como combustible requiere una adaptación técnica de los componentes del vehículo y la infraestructura de abastecimiento de combustible, por lo que se hace hincapié en su uso como aditivo al diésel convencional y no como combustible puro [32]. Además, hay que tener en cuenta que el OME_X tiene un valor calorífico y un contenido energético menores que el diésel, debido al alto contenido en oxígeno [35], por lo que el aumento de la proporción de OME_X en la mezcla, para una configuración del motor dada, resulta en una disminución del calor liberado. Por tanto, cuanto mayor sea esta proporción en la mezcla, más combustible inyectado requerirá el proceso de combustión para mantener la IMEP constante, por lo que, o bien se tendrá que modificar la presión de inyección, o bien la duración de los pulsos [31].

2.4 Técnicas ópticas

Cuando se plantean ensayos para investigación en motores, existen multitud de posibilidades de medida. Para el caso que ocupa a este trabajo, estudiar los procesos fisicoquímicos que ocurren en la cámara de combustión, son ampliamente reconocidas y utilizadas las técnicas ópticas, por su relevancia en lo que a la comprensión de estos procesos se refiere. Actualmente, las técnicas ópticas son una de las principales herramientas experimentales de investigación para estudiar los motores de combustión interna. Estas proporcionan información que facilita la comprensión de los complejos procesos fisicoquímicos que ocurren durante la inyección, la formación de la mezcla, el proceso de combustión y la formación de contaminantes [39]. Las técnicas ópticas son técnicas de medida cuyo principio de medida tiene que ver con la luz (radiación electromagnética), centradas en la termodinámica. Son técnicas no intrusivas, porque perturban lo mínimo el campo de medida, ofrecen una muy buena resolución espacial, temporal y/o rango dinámico de sensibilidad espectral, en función del equipo y su disposición, y permiten la validación de resultados de modelos que son capaces de predecir y analizar procesos, así como

estimar magnitudes difícilmente accesibles experimentalmente. Como cualquier metodología, la aplicación de técnicas ópticas tiene algunos inconvenientes con los que es necesario lidiar. Por un lado, requieren accesos ópticos, por lo que usualmente son necesarias modificaciones en el entorno experimental. Por otro lado, suelen ser costosas de llevar a cabo en cuanto al costo del equipo y el esfuerzo de montaje del ensayo, su realización y el procesado de la información obtenida. Además, su cuantificación no siempre es posible y suele ser complicada [10]. Actualmente, hay diferentes técnicas ópticas disponibles que pueden ayudar a investigar cada paso de la cadena de funcionamiento de los procesos de un motor [39]. En la figura 2.15 se muestran algunas de ellas en función de para qué proceso se emplean.

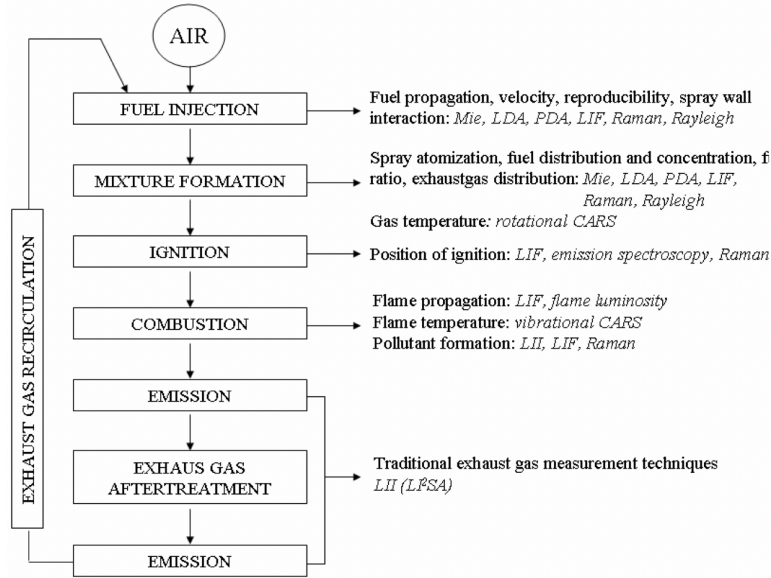


Figura 2.15: Cadena de funcionamiento del motor de combustión y herramientas ópticas de diagnóstico adecuadas [39]

Las diferentes técnicas ópticas existentes se pueden clasificar en función de diferentes criterios. Por ejemplo, si ofrecen medidas cuantitativas o cualitativas; en función de su dimensionalidad, pues puede interesar medir en 0D, línea de vista, 1D, 2D o 3D; en función del fenómeno de estudio o campo de aplicación; si emplean o no una fuente de radiación externa; o en función de los distintos principios de interacción luz-materia [40]. Las técnicas ópticas aplicables al estudio del proceso de combustión se clasifican principalmente en los dos grupos que se muestran a continuación:

- **Técnicas láser avanzadas:** permiten profundizar en fenómenos fisicoquímicos particulares y son especialmente útiles para el desarrollo de modelos. Suelen basarse en fenómenos complejos de interacción radiación-materia, requieren equipos sofisticados y solo pueden aplicarse en ciertos entornos experimentales. Entre estas técnicas destacan las de absorción, espectroscopía de Raman, espectroscopía coherente anti-Stokes de Raman (CARS), incandescencia inducida por láser (LII) y fluorescencia inducida por láser (LIF), entre otras.
- **Técnicas de visualización:** Requieren equipos menos sofisticados, permiten visualizar globalmente el proceso en condiciones realistas y proporcionan información relevante para tareas de investigación tecnológica. Se pueden destacar las técnicas de emisión natural de llama (NL), Schlieren y dispersión de Mie y de Rayleigh.

Como se verá en la sección 3.4, las técnicas empleadas para la realización de este estudio son puramente técnicas de visualización.

Emisión natural de llama

La emisión natural de una llama se encuentra en las partes ultravioleta (UV), visible e infrarroja del espectro electromagnético (ver figura 2.16). Esta, a su vez, se clasifica en dos tipos según su

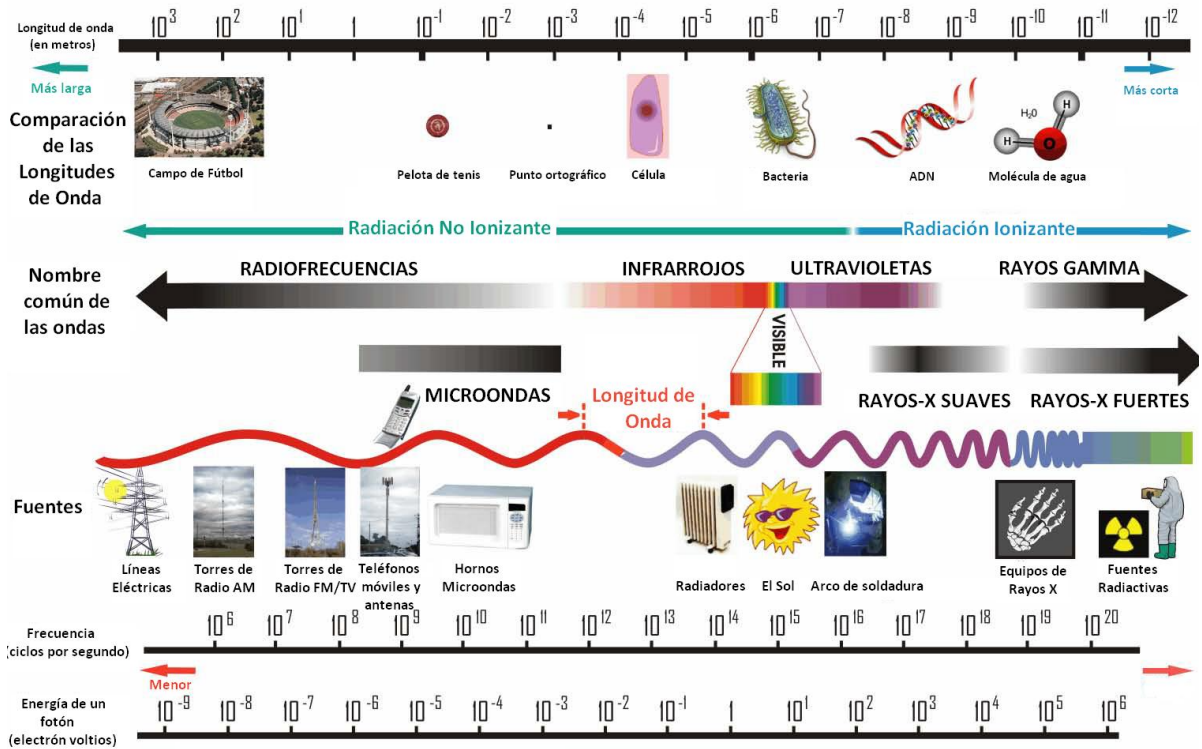


Figura 2.16: Espectro electromagnético

distribución de energía. Por un lado, existe la emisión de energía en un espectro continuo, no discreto, en una amplia región de longitud de onda, que se corresponde a la radiación térmica de las partículas, generalmente en la región de hollín de las llamas de hidrocarburos. También, en algunos casos, esta emisión puede deberse a procesos moleculares como la recombinación de iones o asociaciones y disociaciones de átomos y radicales [41]. Por otro lado, la emisión de energía en un espectro discontinuo y discreto se origina en transiciones entre diferentes niveles de energía de moléculas específicas y se caracteriza por centrarse alrededor de ciertas longitudes de onda estrechas, atribuidas a dichas moléculas [40]. Estos espectros se agrupan en lo que se conoce como bandas de radicales libres. En la figura 2.17 se muestran los espectros típicos

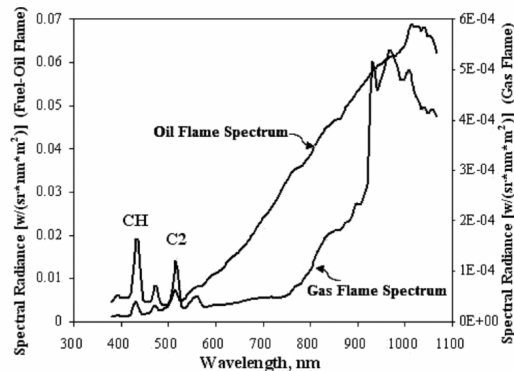


Figura 2.17: Espectro típico de llamas de gasóleo y gas [41]

(rango visible e infrarrojo cercano) de las llamas de hidrocarburos. La principal diferencia entre los espectros de las llamas de gasóleo y las de gas es la presencia de una emisión de fondo continua, debida a la formación de hollín, el cual se comporta de forma similar a un cuerpo gris, pero con una variación más compleja de la emisividad con la longitud de onda. Se ha demostrado que la emisión espectral de las llamas es una combinación de su emisividad monocromática y la ley de radiación del cuerpo negro de Planck (ver figura 2.18).

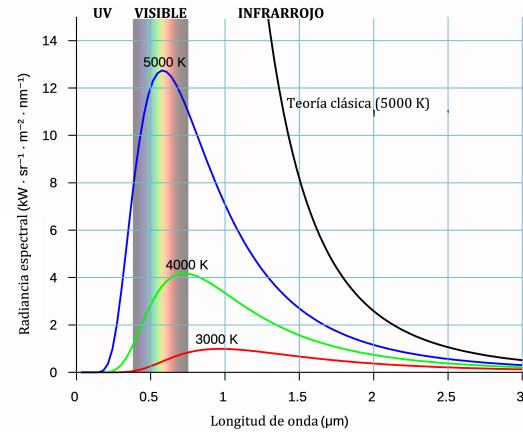


Figura 2.18: Espectro de emisión del cuerpo negro según Planck

$$I_{soot}(\lambda, KL_{2C}, T) = \left(1 - \exp \left[\frac{-KL_{2C}}{\lambda^\alpha} \right] \right) \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp \left[\frac{C_2}{\lambda T} \right] - 1} \quad (2.1)$$

La Ecuación 2.1 representa la emisión espectral continua de llamas debido a la formación de hollín [40]. El término entre paréntesis hace referencia a emisividad de las partículas de hollín, mientras que la expresión de la derecha corresponde a la radiación del cuerpo negro. El parámetro KL_{2C} resulta de aplicar la técnica de pirometría de 2 colores, y se determina a partir de una correlación entre dos medidas ópticas simultáneas en dos longitudes de onda diferentes. Sin embargo, la firma óptica visible y ultravioleta en el espectro de la radiación de una llama generalmente consiste en una combinación de radiación molecular (espectros discontinuos) de especies excitadas electrónicamente. La radiación del proceso de desexcitación de estas especies se conoce como quimioluminiscencia [40]. Las longitudes de onda visible y ultravioleta asociadas con la quimioluminiscencia de varios radicales de combustión, como son el OH, el CH y el C_2 , son, respectivamente, 306 nm, 432 nm y 516 nm. El radical OH resulta interesante porque la radiación de cuerpo negro reducida (de partículas y paredes) en el ultravioleta, incluso en llamas muy luminosas, es más fácilmente observable [41].

RADICAL OH*



Por tanto, se puede concluir que, además de las técnicas convencionales de medición en motores, es común y recomendable aplicar varias técnicas ópticas diferentes, incluso simultáneamente, para determinar los parámetros críticos de los procesos que se desean estudiar, e investigar sus influencias en el rendimiento y la calidad de la combustión de los motores reales. Actualmente,

se puede afirmar que el uso de técnicas de diagnóstico óptico en los novedosos procesos de combustión del motor es crucial para favorecer el desarrollo, sobre todo para los motores que utilizan inyección directa de combustible [39]. En este trabajo se han aplicado las técnicas de visualización de pirometría de 2 colores y quimioluminiscencia de OH, las cuales se explican en mayor detalle en la sección 3.4.

2.4.1 Motor óptico

Cuando se utilizan combustibles alternativos, diferentes geometrías de pistones y/o diferentes estrategias de inyección, resulta de especial interés estudiar los fenómenos fisicoquímicos que ocurren en el interior del cilindro. Para ello, se emplean motores ópticos, que permiten la visualización directa de los fenómenos que tienen lugar en la cámara de combustión, así como la aplicación de técnicas ópticas para el análisis de la combustión, lo que hace de ellos una importante herramienta de cara al estudio de modos de combustión avanzados con el objetivo de reducir emisiones contaminantes y aumentar eficiencias [42]. Existen diversos estudios realizados en los últimos años empleando motores ópticos junto a diferentes técnicas ópticas que buscan comprender mejor los procesos de formación de hollín en los motores MEC empleando diferentes combustibles alternativos [26] y diferentes estrategias de inyección [43]. En la figura 2.19 se muestra el ensamblaje de un motor óptico empleado en el Centro de Motores Térmicos (CMT) de la Universitat Politècnica de València (UPV) para analizar el impacto de combustibles sintéticos, como son el diésel FT y el OME_X, similar al empleado en este trabajo. Se observa que cuenta con un acceso óptico inferior, facilitado por la utilización un pistón de cuarzo [26]. En la sección 3.1 se describe en mayor detalle el motor óptico empleado en los ensayos correspondientes a este trabajo.

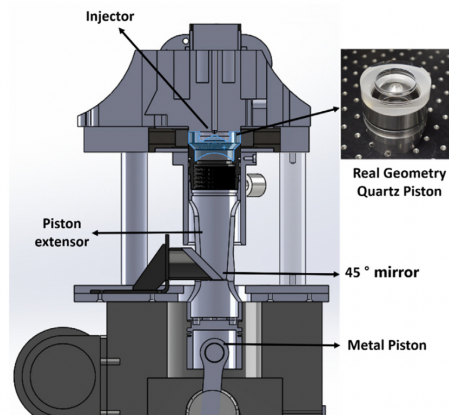


Figura 2.19: Ejemplo de ensamblaje de un motor óptico diseñado en el CMT [26]

En cuanto al diseño de un motor óptico, es necesario garantizar que su operación puede imitar la del motor real, al que se llama indistintamente motor real o metálico. Resulta relevante comentar las principales diferencias entre ambos. Por un lado, los fenómenos de transferencia de calor en el interior del cilindro son diferentes. Por otro lado, la relación de compresión en un motor óptico siempre será inferior a la de su correspondiente motor metálico, debido principalmente a espacios libres más grandes entre el pistón y la camisa y a las bajas revoluciones a las que opera [40]. Finalmente, el hecho de garantizar buen acceso óptico repercute en limitaciones en la capacidad de carga del motor óptico. También hay que tener en cuenta ciertos inconvenientes con algunos componentes ópticos cuando se trabaja con un motor óptico:

- Ensuciamiento de ventanas: restos de combustible, de hollín y de material del anillo del pistón se pueden depositar en las ventanas que permiten el acceso óptico.
- Aparición de ventana de fluorescencia, especialmente cuando se trabaja con radiación láser UV.
- Ruptura de las ventanas: debido a altas cargas del motor, láseres UV de alta energía o problemas de desalineación.

Metodología

3.1 Motor óptico

Los ensayos se realizaron en un motor óptico monocilíndrico (ver figura 3.1), cuyo diseño se ha basado en un motor MEC comercial de General Motors de mediana cilindrada (3.3 litros), con cuatro cilindros, un inyector central y cuatro válvulas por cilindro (dos válvulas de admisión y dos válvulas de escape).

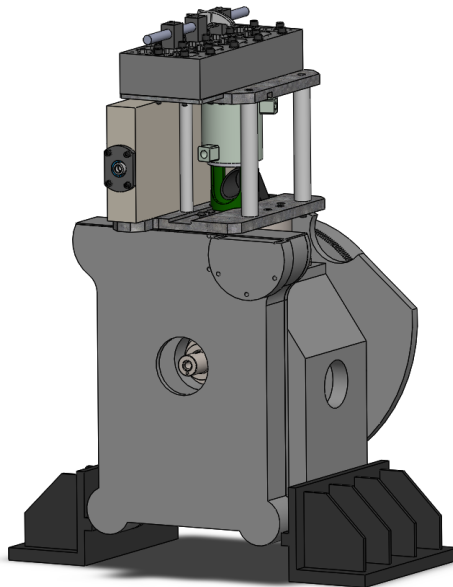


Figura 3.1: Motor óptico Duramax diseñado en el CMT de la UPV

En la tabla 3.1 se representan las principales características geométricas del motor, el cual es de tipo válvulas en cabeza (OHV), ubicadas en la culata. El árbol de levas se encuentra en el bloque del motor, por lo que, para reproducir el mecanismo real de varilla de empuje en el motor óptico, este tiene instalada una caja adicional entre el bloque y la culata en la que se aloja el

Tabla 3.1: Características del motor óptico

Tipo de motor	MEC (4 tiempos)
Número de cilindros [-]	1
Número de válvulas [-]	4
Carrera [mm]	99
Diámetro [mm]	103
Volumen desplazado [cm ³]	825
Longitud de biela [mm]	1636.3
Relación de compresión efectiva [-]	13.3

árbol de levas. De este modo, el diseño del motor óptico permite mantener la misma distancia del árbol de levas a las válvulas que el motor original. Teniendo en cuenta esta configuración, cualquier acceso óptico a la cámara de combustión está bloqueado, excepto el acceso a través del fondo del pistón, gracias a la extensión del mismo (tipo Bowditch), como se muestra en la figura 3.2. Una ventaja de este tipo de diseño es que la relación de compresión efectiva que se puede alcanzar es mayor que la que se puede conseguir en otros diseños de motores ópticos comunes, bastante cercana a la del motor metálico. Con el objetivo de obtener el acceso óptico necesario se utiliza un espejo a 45°, ubicado en el fondo del extensor del pistón.

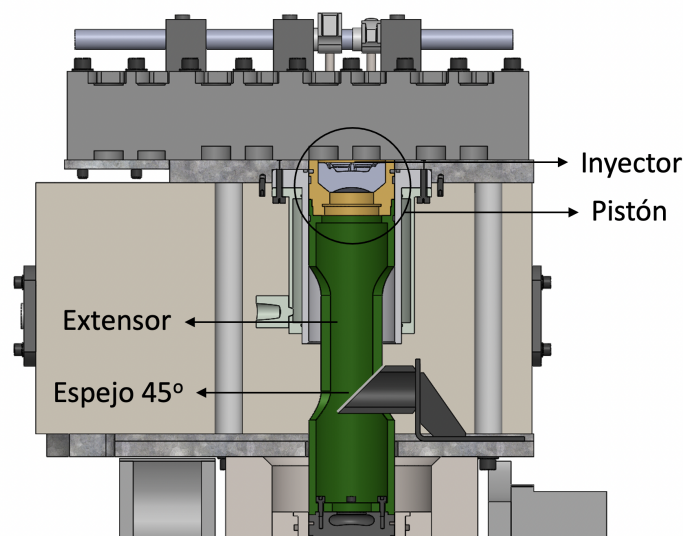


Figura 3.2: Sección del ensamblaje del motor óptico

Respecto al pistón, se ha utilizado una geometría de *bowl* reentrante. Se trata de la geometría más común en los motores de encendido por compresión de pequeña y mediana cilindrada (ver figura 3.3). En este tipo de pistón el recipiente redirige la llama hacia el interior del *bowl* y luego hacia el centro de este. Una pequeña parte de la pulverización se dirige a la región de *squish* para usar el oxígeno disponible en esa región. Debido a la estrechez de la garganta del *bowl* se mejora la mezcla de aire y combustible [11]. En la figura 3.4 se muestra una representación de la sección del pistón, en la que se pueden apreciar las curvaturas reentrantes y el movimiento de propagación de la llama en su interior.

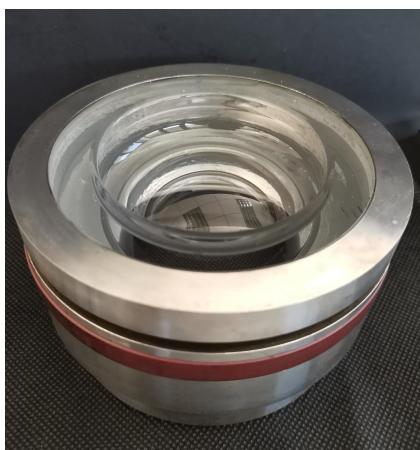


Figura 3.3: Pistón de geometría real (reentrante)

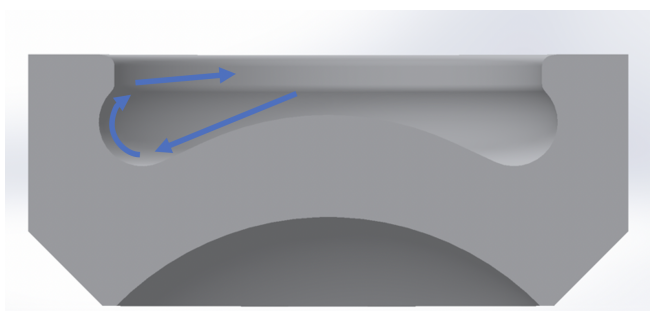


Figura 3.4: Sección del pistón reentrante y movimiento de la llama

3.2 Condiciones de operación y estrategia de inyección

Los ensayos se han realizado bajo unas condiciones de operación del motor constantes, las cuales se resumen en la tabla 3.2. Los ensayos se llevaron a cabo a una velocidad constante del motor de 1400 rpm, utilizando un compresor de tornillo para suministrar el aire de admisión a la presión requerida y una válvula en el escape para simular la contrapresión. Se fijó una presión de admisión en 1.34 bar y una presión de escape 0.2 bar por encima, con el objetivo de simular condiciones de funcionamiento realistas. Por su parte, la temperatura de admisión se asegura gracias al uso de un calentador de aire ubicado justo antes del puerto de admisión y se fijó en 55 °C.

Tabla 3.2: Condiciones de funcionamiento del motor

BMEP [bar]	Velocidad giro motor [rpm]	Presión admisión [bar]	Presión escape [bar]	Temperatura admisión [°C]	Presión inyección [bar]	SOE (°aTCD)
6	1400	1.34	1.54	55	1182	-33.7

Únicamente se ha utilizado una estrategia de inyección para facilitar la comparación de los resultados. Se trata de una estrategia de inyección que incluye dos inyecciones piloto, una inyección principal y una post inyección. La presión de inyección se ha fijó en 1182 bar y la duración del pulso eléctrico varía en función del combustible a ensayar con el objetivo de mantener constante la presión media efectiva del freno (BMEP). El tiempo de permanencia entre pulsos consecutivos y la duración de cada pulso se muestran en la figura 3.5. El inicio de la inyección (SOE) se fijó en 33.7°CAD antes del PMS (-33.7°CAD aTDC). Durante los ensayos, se realizó una inyección de combustible (una combustión) por cada veinte ciclos completos con el objetivo de conseguir las mismas condiciones ambientales iniciales en cada repetición, evitando la influencia de transitorios de temperatura o gases residuales de la combustión anterior. Esto se conoce como modo *skip fire* y sirve para minimizar el estrés térmico y el ensuciamiento de las ventanas. En total se han registrado diez ciclos de combustión consecutivos y se han promediado para realizar los análisis de resultados. El único cambio en las condiciones de operación del motor en los ensayos se refiere al contenido de oxígeno en la admisión. Se han simulado condiciones de EGR mediante el dopado con nitrógeno en el aire de admisión.

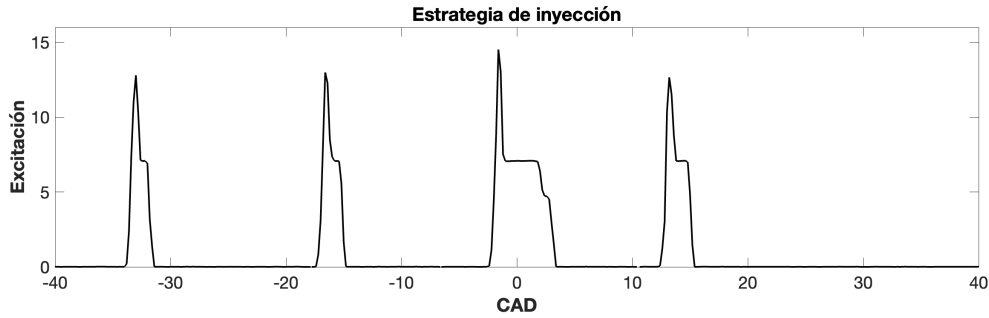


Figura 3.5: Estrategia de inyección

Finalmente, los ensayos se realizaron para una condición nominal, en la que no se ha dopado el aire en la admisión, una condición de bajo EGR y una condición de alto EGR (ver tabla 3.3).

Tabla 3.3: Condiciones de operación del motor óptico (simulación de EGR) [44]

CONDICIÓN	CONTENIDO DE OXÍGENO
Nominal	21 %
Bajo EGR	18 %
Alto EGR	15 %

3.3 Combustibles

Para el caso concreto de este trabajo, se ha empleado una mezcla de combustibles OME_X que contiene un 0.01% de OME_1 , menos de un 0.01% de OME_2 , un 57.9% de OME_3 , un 28.87% de OME_4 , un 10.07% de OME_5 y un 1.91% de OME_6 [44].

Tabla 3.4: Composición combustible OME_X empleado [44]

OME_1	OME_2	OME_3	OME_4	OME_5	OME_6
0.01 %	<0.01 %	57.9 %	28.87 %	10.07 %	1.91 %

Una vez definido el combustible OME_X empleado, se pueden comparar algunas de sus propiedades fisicoquímicas de interés con las de un gasóleo convencional (diésel) (ver tabla 3.5). La principal diferencia entre el diésel y el OME_X , como se puede observar, es el contenido de oxígeno en la molécula. También resulta interesante destacar el poder calorífico inferior, el cual es mucho menor en el combustible oxigenado. Esto repercute directamente en la energía liberada por las mezclas de combustible.

Como ya se ha comentado, se utilizan mezclas diésel- OME_X en distintas proporciones para evaluar el potencial de este último. Estas mezclas se identifican como $D\#\#/O\#\#$, donde el primer valor indica el porcentaje en volumen de diésel en la mezcla y el segundo, el porcentaje de OME_X . Se han empleado cuatro mezclas diferentes para posteriormente comparar los resultados que ofrece cada una de ellas en cuanto a formación de hollín, principalmente. En la

Tabla 3.5: Comparación de propiedades combustibles diésel y OME_X [31]

Propiedades	Diésel	OME _X
Densidad [kg/m ³] (15°C)	829.2	1057.0
Viscosidad [mm ² /s] (40°C)	2.59	1.08
Número de cetano [-]	52	68.6
Poder calorífico inferior [MJ/kg]	41.92	19.21
Contenido de oxígeno [% m/m]	0	47.1

tabla 3.6 se muestran las mezclas y las proporciones de combustible, empleando desde un diésel convencional (puro), hasta una mezcla con un 70% de OME_X. En la sección anterior se han comentado las condiciones de funcionamiento del motor (nominal, bajo EGR y alto EGR). Es importante comentar que, para el caso de la mezcla 70O30D únicamente se ha trabajado con la condición nominal, debido a problemas en la estabilidad de la combustión durante los ensayos para las condiciones de EGR.

Tabla 3.6: Mezclas de combustible y proporciones

Mezcla de combustibles	Contenido de OME _X y diésel
100D	100 % diésel (puro)
30O70D	30 % OME _X - 70 % diésel
50O50D	50 % OME _X - 50 % diésel
70O30D	70 % OME _X - 30 % diésel

3.4 Instalación, equipo y técnicas empleadas

Para la realización de los ensayos y el registro de los parámetros termodinámicos del motor óptico, se empleó una bomba de alta presión convencional (Bosch CP3) y un riel común para suministrar el combustible a un inyector de solenoide estándar de ocho orificios. Las presiones instantáneas de admisión y escape se midieron con un transductor piezorresistivo (Kistler-4049A5), mientras que la presión en el interior del cilindro se obtuvo con un transductor piezoeléctrico (Kistler-6124A). El registro de la señal de presión que ha permitido realizar el análisis termodinámico del ciclo se llevó a cabo empleando un osciloscopio (Yokogawa DL708E), sincronizado a su vez con un codificador de cigüeñal con resolución de 0.5 CAD que indica el ángulo de cigüeñal girado en cada instante (ver figura 3.6).

Por lo que respecta al montaje óptico, se registraron imágenes de la radiación proveniente del interior de la cámara de combustión con una configuración como la que se muestra en la figura 3.7. La radiación de la llama pasa a través del pistón, fabricado en cuarzo, y es reflejada por un espejo elíptico inclinado 45°, como se indica en la figura 3.2. Posteriormente, esta se dirige a un espejo dicróico (DMSP805L), el cual permite la transmisión a través de él de radiación visible y refleja solo una pequeña porción del espectro ultravioleta, alrededor de una



(a) Bomba Bosch CP3

(b) Piezorresistivo Kistler-4049A5

(c) Piezoeléctrico Kistler-6124A

(d) Osciloscopio Yokogawa DL708E

Figura 3.6: Equipo de medida

longitud de onda de 310 nm. Esta radiación reflejada es ideal para dirigirse a una cámara de alta velocidad intensificada que registre la quimioluminiscencia del radical OH^* . Seguidamente, la luz visible que atraviesa el espejo dicróico llega a un divisor de haz (*beam splitter*), el cual refleja el 50 % de la radiación incidente y transmite el otro 50 %. De esta forma, la radiación incidente en el divisor del haz se divide en dos, dirigiéndose cada nuevo haz a una nueva cámara de alta velocidad, las cuales cuentan, una con un filtro verde (longitud de onda de 560 nm) y la otra con un filtro rojo (longitud de onda de 660 nm). El registro de imágenes con estas dos cámaras permite la posterior aplicación de la técnica conocida como pirometría de dos colores. Durante los ensayos, las tres cámaras rápidas se dispararon de forma simultánea, de tal forma que se pudiese realizar posteriormente una comparación, imagen por imagen, entre ellas.

Por lo que respecta a las técnicas ópticas que se han aplicado, como se ha comentado, se han aplicado simultáneamente las técnicas de imágenes de quimioluminiscencia de OH^* de alta velocidad y pirometría de dos colores para analizar los procesos de formación y oxidación de hollín durante la combustión.

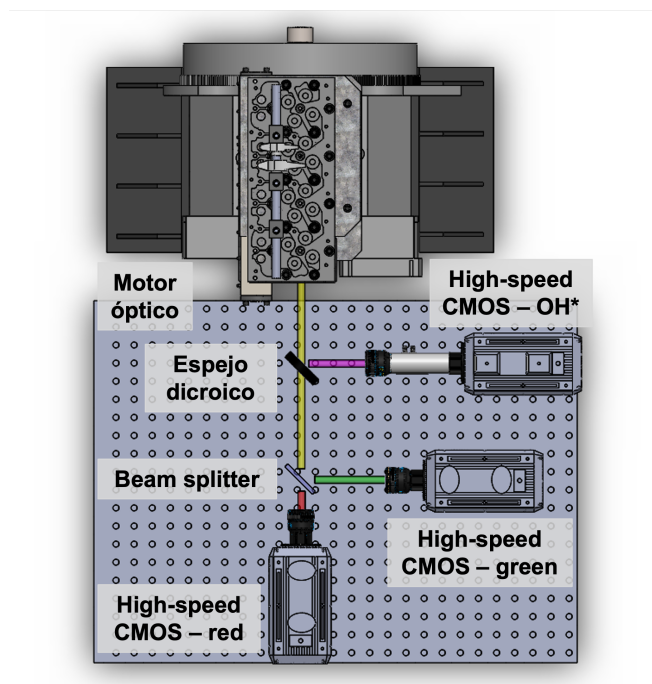


Figura 3.7: Configuración del montaje óptico

3.4.1 Quimioluminiscencia de OH^*

La quimioluminiscencia de OH^* se ha considerado históricamente un buen trazador de las reacciones de oxidación en las zonas de alta temperatura durante el proceso de combustión por difusión de hidrocarburos [45]. Dicho esto, en este trabajo se han empleado imágenes de quimioluminiscencia de OH^* de alta velocidad para analizar las reacciones de oxidación en la cavidad del pistón. Hay que tener en cuenta que la resolución espacial de los resultados está limitada debido a que la señal se ha obtenido integrando en línea de vista. Para los ensayos se utilizó una cámara rápida Photron SA5 (CMOS) acoplada a un intensificador de alta velocidad Hamamatsu C10880-03F. El fotocátodo ofrece una sensibilidad desde el rango ultravioleta hasta el infrarrojo cercano (longitudes de onda en el rango 185-900 nm). Se utilizó una lente ultravioleta Nikon Rayfact 105 mm f4.5 y se colocó un filtro de paso-banda de banda estrecha, centrado en 310 nm con 10 nm de ancho medio máximo (FWHM) frente a la lente, con el objetivo de evitar toda radiación diferente a la de emisión máxima de OH^* . El tiempo de exposición de la cámara se fijó en $39.75 \mu s$ y su ganancia se ajustó para maximizar el rango dinámico. Durante los ensayos, se fijó la velocidad de adquisición en 25000 fps, con una resolución de 4.4 píxeles/mm.

3.4.2 Pirometría de dos colores

La pirometría de dos colores consiste en el registro de la radiación térmica del hollín en dos longitudes de onda diferentes para posteriormente calcular su temperatura. Mediante el uso de la ley de Planck se define la intensidad de radiación de un cuerpo negro a una temperatura y longitud de onda específicas y los conceptos de emisividad de un cuerpo no negro y temperatura aparente. La emisividad de una fuente de radiación, que en el caso de este trabajo son las partículas de hollín caliente, se puede calcular según la Ecuación 3.1, donde aparece la segunda constante de Planck ($C_2 = 1.438810^{-2} mK$), T es la temperatura de la fuente de radiación y T_a es la temperatura aparente, también llamada temperatura de brillo.

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{e^{(C_2/\lambda T)} - 1}{e^{(C_2/\lambda T_a)} - 1} \quad (3.1)$$

Hottel y Broughton desarrollaron una correlación empírica que, en la práctica, permite estimar la emisividad de las partículas de hollín (Ecuación 3.2), donde K es un coeficiente de absorción, proporcional a la densidad de las partículas de hollín y L hace referencia al espesor geométrico de la llama a lo largo del eje óptico del sistema de detección. El parámetro α depende de las propiedades físicas y ópticas del hollín, que, para la mayoría de combustibles, en el rango visible se puede utilizar $\alpha = 1.39$ [46].

$$\epsilon_{\lambda} = 1 - e^{-\left(\frac{KL}{\lambda^{\alpha}}\right)} \quad (3.2)$$

Normalmente, se suele tratar a los parámetros K y L como un único parámetro que representa el espesor óptico de la nube de partículas de hollín (KL). Combinando la Ecuación 3.1 y la Ecuación 3.2, el parámetro KL se puede expresar como se muestra en la Ecuación 3.3.

$$KL = -\lambda^{\alpha} \ln \left[1 - \left(\frac{e^{(C_2/\lambda T)} - 1}{e^{(C_2/\lambda T_a)} - 1} \right) \right] \quad (3.3)$$

Suponiendo que el parámetro KL permanece constante para todo el rango visible, se puede aplicar la Ecuación 3.3 para las dos longitudes de onda registradas, λ_1 y λ_2 , y de esta forma obtener la temperatura (T) de las partículas de hollín, tal y como se muestra en la Ecuación 3.4. Una vez T es calculada, se puede hallar el valor correspondiente de KL según la Ecuación 3.3.

$$\left[1 - \left(\frac{e^{(C_2/\lambda_1 T)} - 1}{e^{(C_2/\lambda_1 T_{a1})} - 1} \right) \right]^{\lambda_1^{\alpha_1}} = \left[1 - \left(\frac{e^{(C_2/\lambda_2 T)} - 1}{e^{(C_2/\lambda_2 T_{a2})} - 1} \right) \right]^{\lambda_2^{\alpha_2}} \quad (3.4)$$

Para registrar la temperatura de radiación de las partículas de hollín, durante los ensayos, se utilizaron dos cámaras de alta velocidad Photron NOVA S9 (CMOS). Se utilizaron dos lentes Karl-Zeiss Makroplanar de 100 mm f2 y dos filtros paso banda de banda estrecha centrados en 560 nm (λ_1) y 660 nm (λ_2) con 10 nm FWHM. Se ajustó el tiempo de exposición de cada cámara a la intensidad de radiación de cada longitud de onda (mayor para el canal de 560 nm). Es necesario asegurar la coincidencia temporal y espacial entre la señal de ambas longitudes de onda para asegurar la máxima precisión del método de medida. Por lo que respecta al tiempo, se logra la coincidencia sincronizando la adquisición de las dos cámaras. En cambio, para lograr coincidencia espacial es necesario aplicar una rutina de preprocesado que transforme uno de los canales tomando el otro como referencia. Para este trabajo, se parte de medidas de KL preprocesadas, por lo que únicamente se ha trabajado en el procesado y postprocesado.

3.5 Procesado

Para procesar la información proporcionada por los ensayos, se ha empleado principalmente el software MATLAB, empleando en su mayoría scripts y funciones ya existentes del departamento de Técnicas Ópticas del CMT de la UPV e incluyendo alguna modificación puntual del código, como se comentará posteriormente en este apartado. También se ha hecho uso del software Dewesoft para los cálculos correspondientes al análisis termodinámico del ciclo de funcionamiento del motor óptico, así como para la obtención de ciertas medidas de interés, como es la estrategia del sistema de inyección.

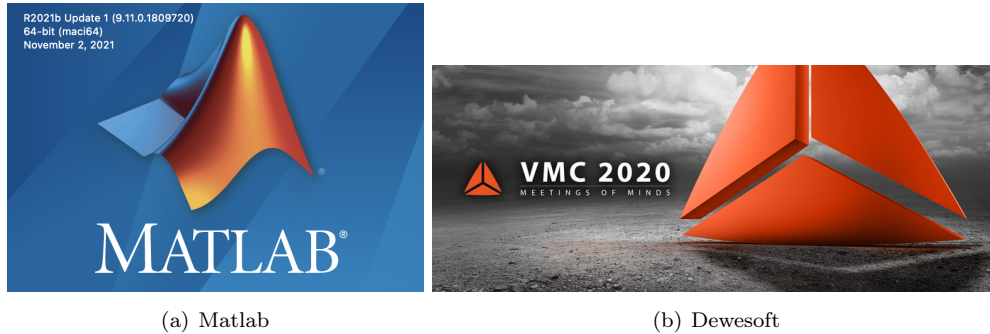


Figura 3.8: Software empleado para el procesado de la información

3.5.1 *Análisis termodinámico*

Como ya se ha comentado, lo primero que se ha realizado ha sido el análisis termodinámico del ciclo. Para ello se ha partido de los archivos proporcionados con extensión “.dxd”, que se han ejecutado con el software Dewesoft para extraer la información necesaria, como tasa de liberación de calor, liberación de calor acumulada, ángulo CAD y pulsos de inyección, entre otros. Posteriormente, esta información se ha guardado en archivos “.m”, para posteriormente trabajar con este último fichero de manera más efectiva. Mediante el script “RoHR_Plot.m”, modificado a partir de un script del departamento, se han representado las gráficas de RoHR y liberación de calor acumulada, como se muestran en la figura 3.9. Analizando estas gráficas, es posible deducir el proceso de combustión, como se ha explicado en la subsección 2.1.2. Teniendo en cuenta los pulsos de inyección y los picos de la tasa RoHR, se pueden diferenciar las etapas del proceso de combustión: tiempo de retraso, combustión premezclada, combustión por difusión y combustión tardía.

3.5.2 *Procesado de las imágenes*

Seguidamente, entrando en el procesado de las imágenes registradas por las tres cámaras de alta velocidad, ha sido necesario tratar la información en formato “.ent” mediante el uso de distintas funciones existentes, creadas con anterioridad por el departamento, como es el caso de “getarchivos.m”. Asimismo, se ha creado una rutina en el script “Image_Processed.m” mediante la cual se crea una máscara en la imagen que elimina toda información exterior a la zona de interés, que es la cámara de combustión, eliminando los valores fuera de ella para que no afecten a los cálculos promedio de las diez repeticiones de cada medida. Posteriormente, se realiza un recorte, con el objetivo de centrar la imagen resultado más aún si cabe en la zona de interés. En la figura 3.10 se muestra un ejemplo de una imagen registrada en un instante determinado antes y después de aplicar la máscara y el recorte de la imagen.

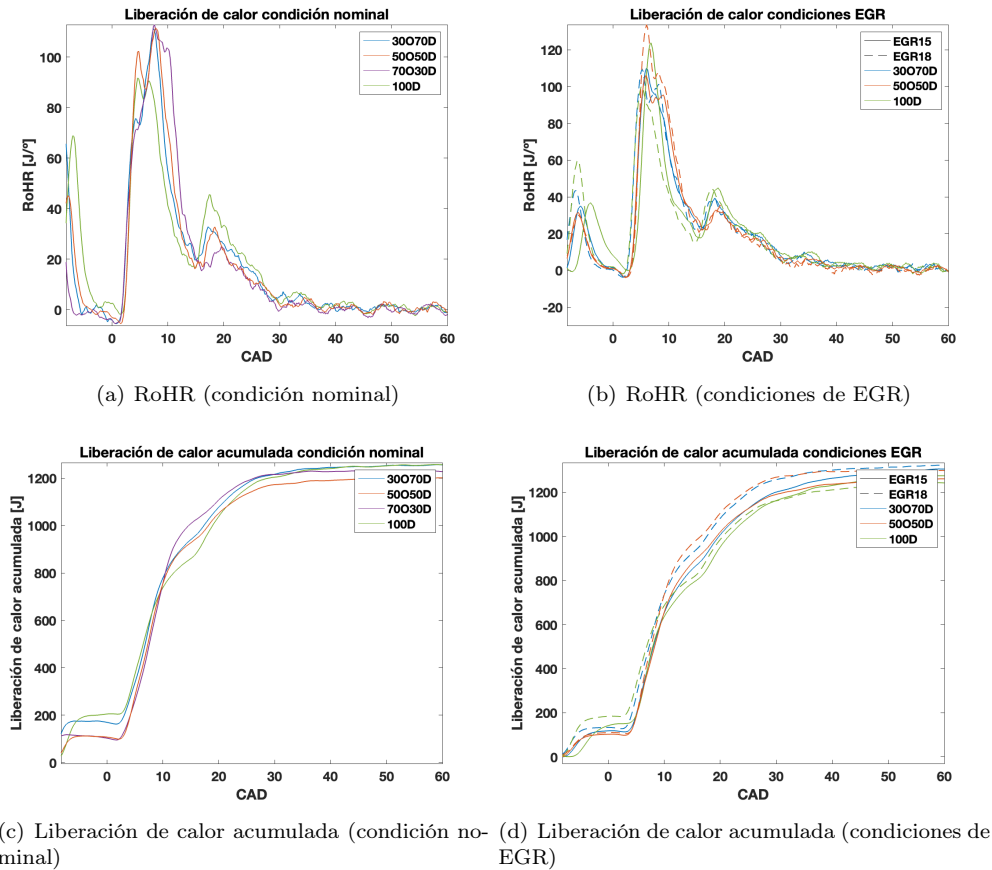


Figura 3.9: Tasas de liberación de calor para las diferentes mezclas de combustibles y condiciones de operación y liberación de calor acumulada

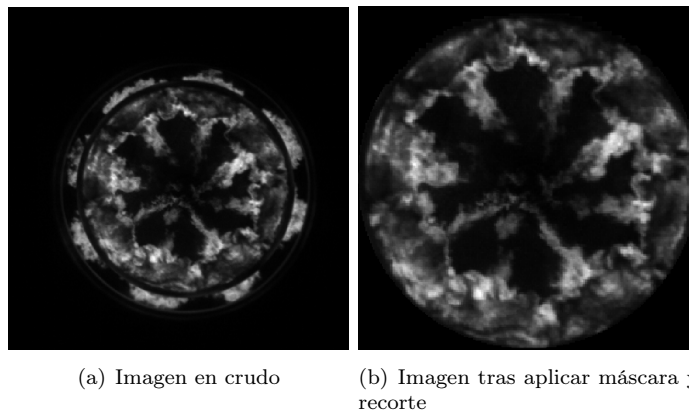


Figura 3.10: Imagen de una misma cámara para un instante CAD concreto antes y después de aplicar la máscara y el recorte

Una vez las imágenes ya están recortadas, se procesa la información para cada cámara, calculando imágenes promedio de las diez repeticiones de cada ensayo e intensidades de píxel promedio y acumuladas. Del mismo modo, se calcula la desviación estándar teniendo en cuenta las diez repeticiones, por si resultara de interés su representación posteriormente. También, en este punto del procesado, se definen las condiciones de operación de que se han indicado en la sección 3.2. Finalmente, toda esta información promedio se guarda en el archivo “Procesado.mat”; la información para cada repetición, en el archivo “Rep.mat”, y la información geométrica de

la máscara en “Geometry.mat”. También se crea la carpeta “Imágenes” en la que se guardan todas las imágenes promedio de cada ensayo para cada cámara, representadas en diferentes colores usando la función de MATLAB “colormap” en función de qué cámara representan (ver figura 3.11) Una vez la información está guardada en los tres archivos “.mat”, se puede proceder a representar la información deseada para el análisis de los resultados. De ahora en adelante se explica el procedimiento por separado de las medidas de quimioluminiscencia de OH^* de alta velocidad y las medidas de dos colores.

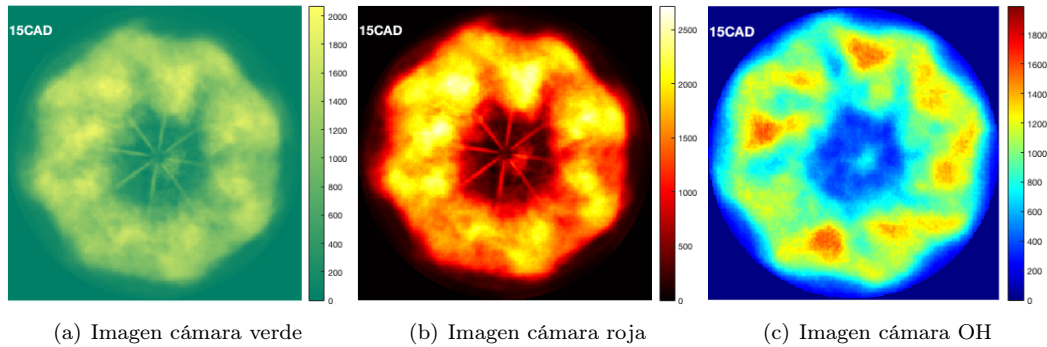


Figura 3.11: Representación de la intensidad de píxel en imágenes captadas por las tres diferentes cámaras en un instante CAD determinado aplicando colormap

3.5.3 Quimioluminiscencia de OH^*

Para empezar, se ha hecho uso del script “OH_Plot.m”. Al inicio se ha creado una subrutina que permite recorrer los distintos directorios donde se ubican las carpetas de “Procesado” anteriormente creadas, así como definir una matriz que incluya todas las combinaciones de geometría de pistón, mezcla de combustibles y condición de operación existentes. En la figura 3.12 se resumen las geometrías, mezclas y condiciones que se ha indicado a lo largo del trabajo que se desean comparar. Principalmente, se desea representar la intensidad de píxel promedio y acumulada, en función del CAD, para las diferentes mezclas de combustible y condiciones, por lo que para la obtención de las gráficas se va modificando la parte final del código en función de qué y cómo se quiere representar. Se entra más en detalle al respecto en el Capítulo 4.

“REENTRANT” PISTON			
100D	30070D	50050D	70030D
Nominal (21% O_2)	Bajo EGR (18% O_2)	Alto EGR (15% O_2)	

Figura 3.12: Tabla resumen de aspectos a analizar y comparar

3.5.4 Pirometría de dos colores

En este caso, se parte de un preprocesamiento de las imágenes de las cámaras rápidas “verde” y “roja”, el cual, tras haber obtenido la información almacenada en “Procesado.mat”, “Rep.mat” y “Geometry.mat”, permite obtener los valores de KL para cada ensayo, en cada instante CAD. Dado que los valores de KL se han proporcionado por parte de los ingenieros que realizaron los ensayos, se ha creado el script “KL_Image_Processed.m” con el objetivo de adecuar las imágenes obtenidas a las procesadas anteriormente (ver Apéndice A). En este caso, la información extraída se guarda en las estructuras “KL.mat” y “Geometry.mat”. Posteriormente, es posible ejecutar el script “KL_Plot.m”, incluyendo una subrutina al inicio similar al caso de “OH_Plot”, con el objetivo de crear la matriz que recoge los ensayos existentes. Al igual que

para el caso de las imágenes de quimioluminiscencia, se desea representar las intensidades de píxel promedio y acumulada, en función del CAD, para las diferentes mezclas de combustibles y condiciones de operación. Se opera del mismo modo que en el caso anterior y se va modificando el código en función de qué y cómo se desean obtener las diferentes gráficas.

3.5.5 Mapas radiales

Con el objetivo de analizar en mayor profundidad los distintos procesos de combustión y formación de hollín, se ha decidido representar también los mapas radiales, tanto para KL como para OH*, los cuales representan las intensidades promediadas, en función del ángulo CAD, a distintas distancias radiales, conteniendo anillos de 0.5 mm de espesor. Esto permite una mayor comprensión espacial de dichos procesos, así como facilita la correlación entre las representaciones de ambas técnicas. Para ello se han modificado y empleado los scripts del departamento “OH_Radial_Analysis.m” y “KL_Radial_Analysis.m” para poder trabajar desde los directorios de este trabajo. La información extraída y calculada mediante el uso de estos dos scripts se ha guardado en estructuras con los nombres “(nombre del test)_OHRadialMaps.mat” y “(nombre del test)_KLRadialMaps.mat”, en función de si se trata de un cálculo de OH o de KL. Finalmente, mediante el uso del script “KL_Plot.m”

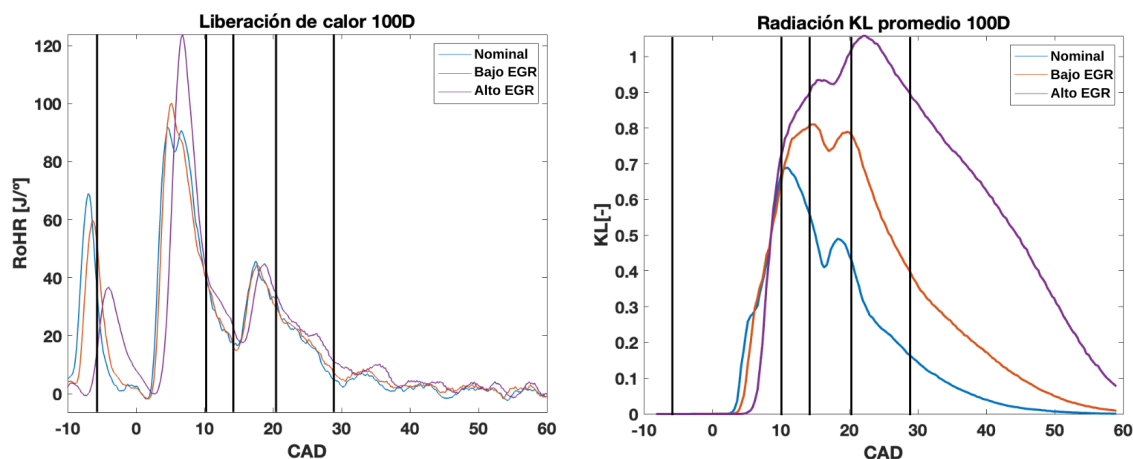
Resultados

Como ya se ha indicado, se realizaron ensayos utilizando cuatro combustibles diferentes (diésel puro y tres mezclas diésel-OME_X) y tres condiciones de operación (sin EGR, bajo EGR y alto EGR). Para estudiar el efecto de los diferentes factores en el proceso de combustión y la formación de hollín, en primer lugar, se han comparado las tres condiciones de operación y, posteriormente, para cada condición, se ha comparado el efecto de las mezclas de combustible. De este modo se permite una mayor comprensión sobre la influencia de cada parámetro en los resultados, lo que permite una mejor y más completa comparación.

4.1 Efecto de las condiciones de operación

A la hora de analizar la información procesada, primero se han representado las curvas de tasa de liberación de calor (RoHR), radiación de KL y radiación de quimioluminiscencia de OH* promediadas para los ensayos con combustible diésel puro. Se ha optado por no representar las barras de error (desviación típica), ya que así se facilita la lectura de las mismas. De esta forma se pueden comparar fácilmente los procesos de combustión para las tres condiciones de operación, así como la formación y la oxidación del hollín. Se han seleccionado los siguientes instantes CAD para el análisis de cada ensayo: -6.9°, 10.3°, 13.6°, 20.4° y 29.1°. De esta forma, se pueden observar detalladamente el instante correspondiente a la segunda inyección piloto, así como los valores máximos de radiación de KL y quimioluminiscencia de OH*, centrandó el análisis en la fase de combustión por difusión, que caracteriza el proceso de combustión en los MEC y representa la principal formación de hollín, como se ha explicado en la sección 2.1. Asimismo, se permite el análisis de la combustión tardía, centrandó el enfoque en la finalización de los procesos de oxidación y la detección del hollín restante.

Por lo que respecta al análisis termodinámico, en la figura 4.1.(a) se representa la tasa de liberación de calor (RoHR). Como se puede observar, la tasa de liberación de calor sufre pocos cambios. Destaca un aumento del pico máximo durante la inyección principal de combustible, a medida que el contenido de oxígeno en la admisión disminuye. Para 7°CAD, se observa que la alta tasa de EGR alcanza un pico superior que el de las otras dos condiciones, atrasándose ligeramente el proceso de liberación de calor, siendo el pico de la baja tasa de EGR también ligeramente superior al de la condición nominal. Resulta interesante mencionar que durante



(a) Curvas de tasa de liberación de calor promedio para 100D

(b) Curvas de KL promedio para 100D

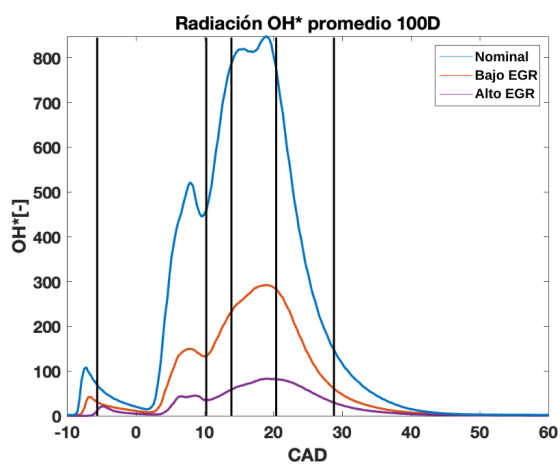

 (c) Curvas de OH^* promedio para 100D

Figura 4.1: Curvas promedio para el combustible 100D

la segunda inyección piloto esto no sucede así, pues una menor tasa de EGR está relacionada con una tasa de liberación de calor mayor adelantada en el tiempo (CAD). Esto tiene sentido, pues cuanto menor es concentración de oxígeno en la admisión, más le cuesta al combustible reaccionar, por lo que una vez se produce la inyección principal, queda más combustible por quemar, produciendo una liberación de calor mayor, ligeramente más tarde. Por lo que respecta a la gráfica de KL representada en la figura 4.1.(b), la diferencia entre las tres condiciones de operación es notablemente considerable. Se puede observar cómo, a medida que se aumenta la tasa de EGR, el pico de la curva de KL aumenta notablemente y se desplaza hacia la derecha, retrasando su caída. Dado que, como se ha comentado en la sección 3.5, el KL es un indicador de la formación de hollín, se puede confirmar que, al aplicar tasas de EGR cada vez más altas, al mismo tiempo que se reducen las emisiones de NO_x , se forma más hollín. Al igual que en el caso de las curvas de RoHR, se puede observar como cuanto mayor es la tasa de EGR, más tarde empieza la radiación de KL, debido a que al combustible le cuesta ligeramente más quemarse. En cuanto a las curvas de radiación de quimioluminiscencia de OH^* (figura 4.1.(c)), como era de esperar, se observa lo opuesto a las curvas de KL. A medida que aumenta la simulación de tasa de EGR, menor es la radiación de OH^* , debido al menor contenido en oxígeno en la admisión. Del mismo modo, la radiación de OH^* finaliza antes, lo que se asocia a procesos

de oxidación más cortos. Esto se traduce en una peor y menor oxidación del hollín, lo cual conlleva una mayor presencia de este contaminante en la cámara de combustión.

En la figura 4.2 y la figura 4.3 se han representado diferentes marcos de radiación de KL y quimioluminiscencia de OH^* , para los instantes seleccionados, anteriormente indicados. Es necesario tener en cuenta, al igual que para las gráficas, que se han promediado 10 ciclos de combustión para cada condición, como se ha descrito en la sección 3.5, y, para la representación de las imágenes de KL, se ha utilizado la misma escala en el mapa de colores en todas las condiciones (0-3). Se puede observar el proceso de combustión en el interior de la cámara de combustión, así como su distribución espacial, y se puede apreciar cómo la radiación de KL se retrasa para las condiciones de EGR, aumentando considerablemente la intensidad y tardando más en desaparecer. Las principales diferencias aparecen a partir de 10.3° CAD, donde se puede observar que apenas existen diferencias entre las tres condiciones en cuanto a la radiación de KL. A partir de este instante, se observa que cuanto mayor es la tasa de EGR, mayor radiación de KL aparece, manteniéndose notablemente más en el tiempo. A medida que avanza el proceso de combustión (ver instante 20.4° CAD), se hace evidente que el hollín que queda en la cámara de combustión es el que no se ha podido oxidar, en las zonas por las que han fluido los chorros de inyección de combustible y su choque con la pared exterior de la cavidad pistón.

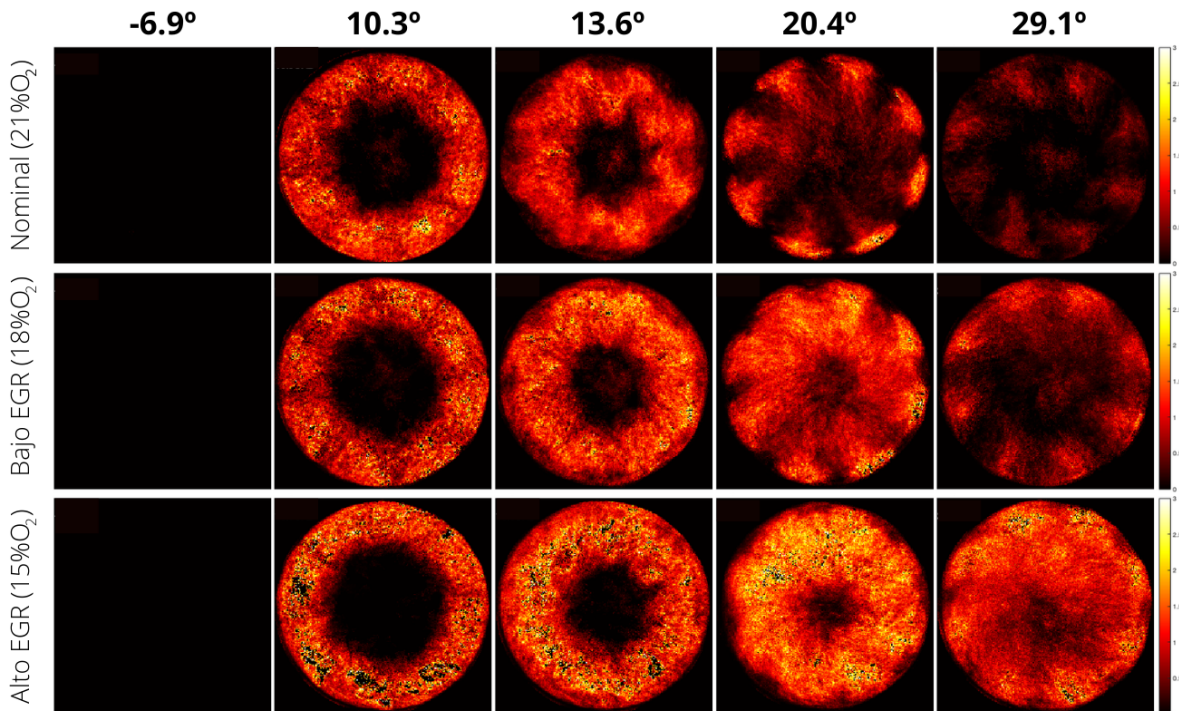


Figura 4.2: Imágenes de radiación de KL en el interior de la cámara de combustión

Si se observa la figura 4.3, salta a la vista la enorme reducción en la radiación de OH^* a medida que aumenta la tasa de EGR, debido a la reducción de oxígeno en la admisión. Se ha utilizado la misma escala de colores para las tres condiciones, por lo que para los casos de EGR no se diferencian las zonas de oxidación y únicamente se contempla la reducción de intensidad obtenida. El rango dinámico corresponde a intensidades de píxel entre los valores de 0 y 2000. Se puede observar que la mayoría de las reacciones de oxidación se producen cerca de las paredes externas del pistón, recirculándose ligeramente hacia dentro a medida que avanza el proceso de combustión, pero manteniéndose concentradas principalmente en la periferia.

[Resulta necesario mencionar que para la representación se han utilizado diferentes escalas del mapa de colores para cada una de las tres estrategias. El rango dinámico para la condición nominal corresponde a intensidades de píxel entre los valores de 0 y 2400. En cambio, se ha aumentado el rango dinámico en un 73.7% para la condición EGR18 (0-700) y en un 89.58% para la condición EGR15 (0-250), de tal forma que los procesos de oxidación de imágenes sean visualmente comprensibles. Este aumento en el rango dinámico de las representaciones hace más que evidente la reducción de la radiación de quimioluminiscencia de OH^* y se mantiene a lo largo del análisis para cada una de las condiciones.]

[Si se observa el instante 29.1° CAD, durante la fase de combustión tardía, se puede concluir que, para la condición nominal (21% oxígeno), debido a las bajas intensidades tanto de KL como de OH^* , el proceso de combustión prácticamente ha finalizado. En cambio, para las condiciones de EGR, a pesar de que los procesos de oxidación ya han concluido, finalizando antes cuanto más alta es la tasa de EGR, se puede observar como la radiación de KL, asociada a la formación de hollín, sigue siendo notablemente elevada.]

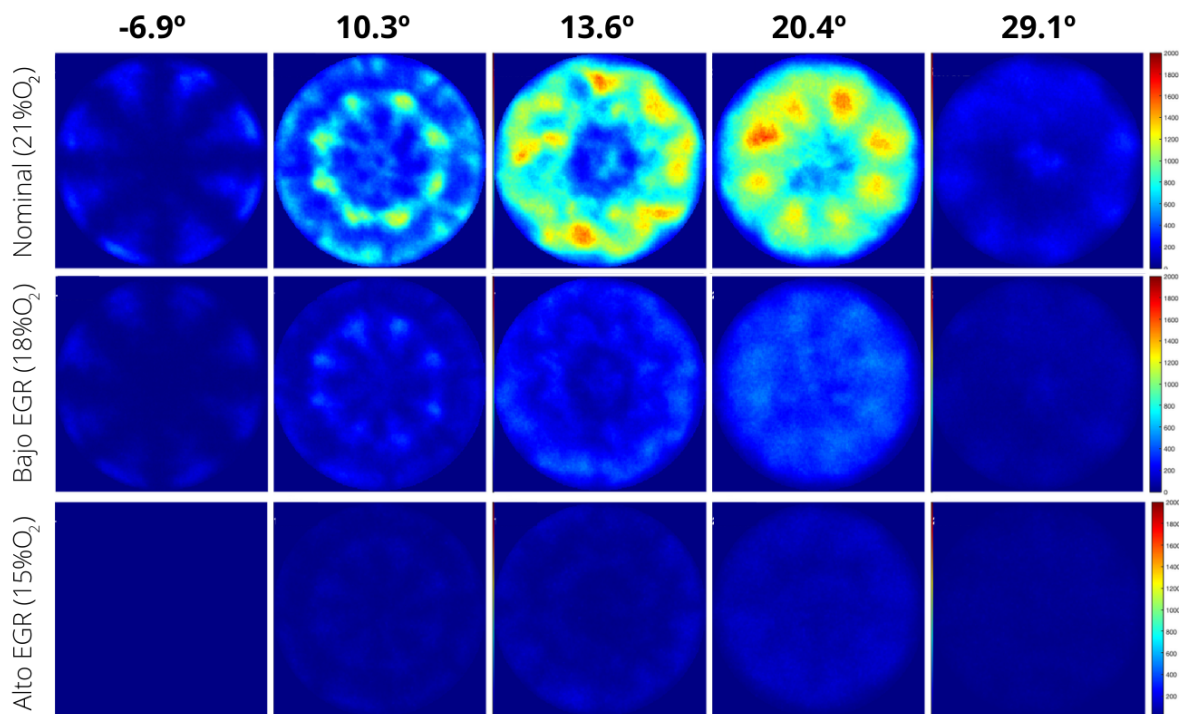


Figura 4.3: Imágenes de quimioluminiscencia de OH^* en el interior de la cámara de combustión

Resulta interesante observar la correlación entre las nubes más grandes e intensas que aparecen en la radiación de OH^* y las zonas oscuras en las imágenes de radiación de KL, lo que confirma que una mayor intensidad de OH^* representa mejores procesos de oxidación de hollín. En las comparaciones de combustibles para el caso nominal esto será más evidente, pues en este caso no se identifican las zonas de máxima radiación para las condiciones de EGR debido al rango dinámico en que se representan. A continuación, se muestran una serie de mapas radiales que permiten mejorar la comprensión de esta correlación, teniendo en cuenta que la intensidad que se representa, en función de la distancia radial del pistón y el ángulo CAD, es un promedio del anillo a esa distancia radial (ver figura 4.4

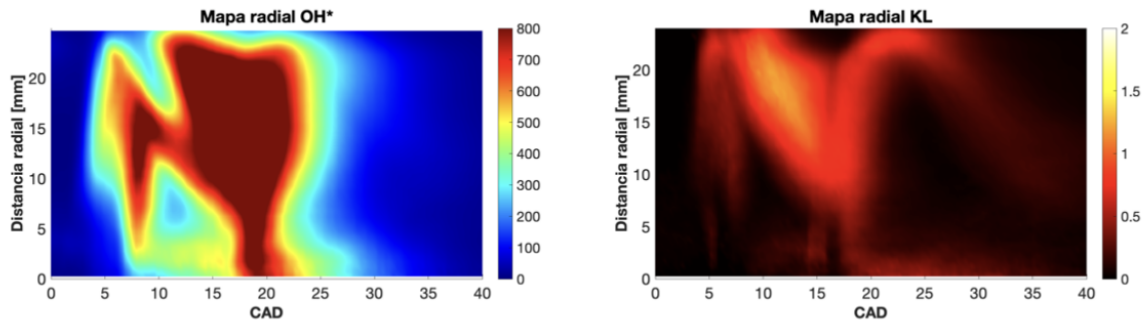
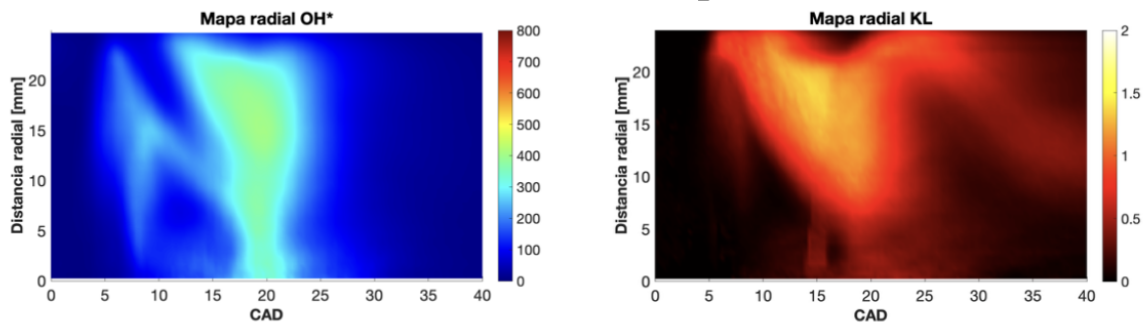
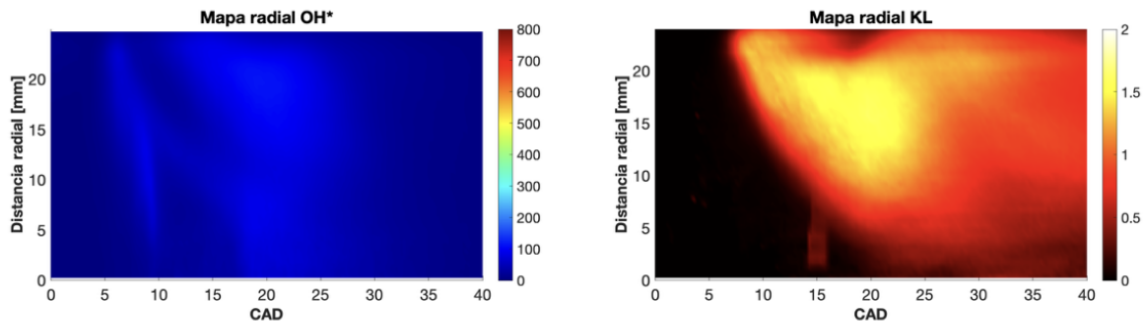
100DNominal (21%O₂)Bajo EGR (18%O₂)Alto EGR (15%O₂)

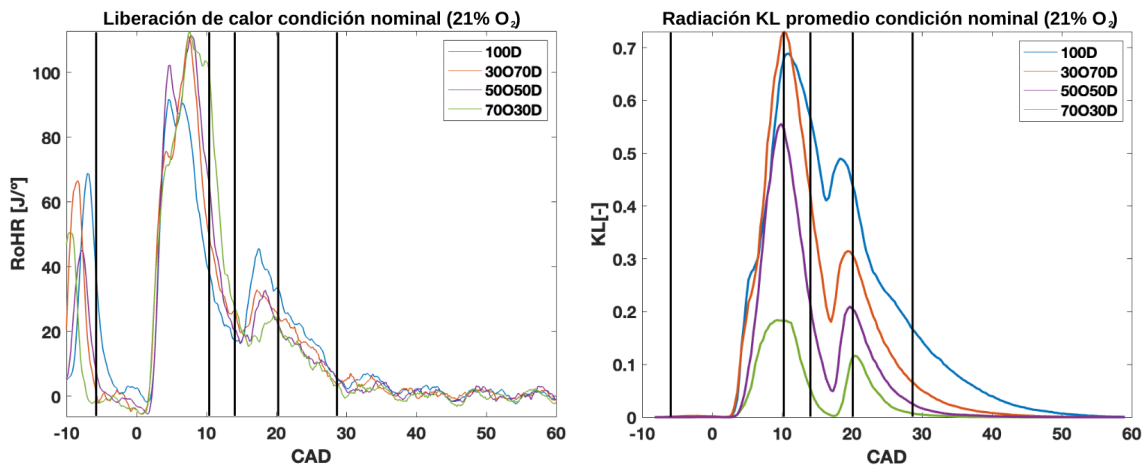
Figura 4.4: Mapas radiales de radiación KL y OH* para el combustible 100D

4.2 Efecto de las mezclas de combustibles

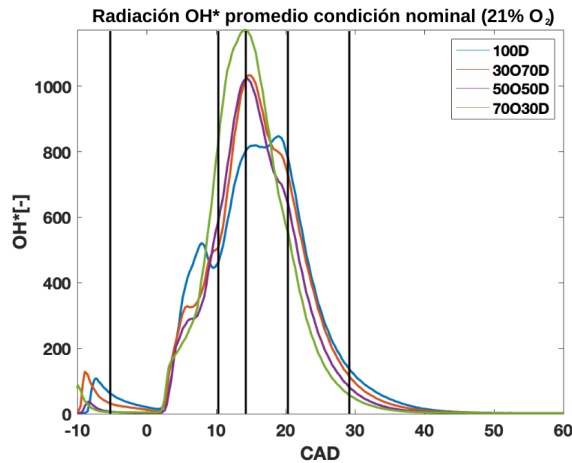
A continuación, se analiza el efecto de la adición de OME_X en la mezcla para cada una de las condiciones. De esta forma se puede determinar qué beneficios, en el caso de haberlos, se obtienen del uso del *e-fuel* cuando se trabaja en condiciones sin y con recirculación de los gases de escape. Como se ha indicado en la sección 3.3, se han ensayado dos mezclas diferentes de combustible diésel-OME_X (30O70D y 50O50D) para las tres condiciones de funcionamiento y se ha estudiado el efecto de una mezcla con el 70% de OME_X para la condición nominal, ya que al aplicar dicha mezcla en condiciones de EGR se obtenían inestabilidades en el proceso de combustión, como son problemas en los procesos de mezcla, que impedían la correcta quema del combustible, así como dificultades para llegar a la presión de inyección.

4.2.1 Condición nominal

Para comenzar, se ha representado la tasa de liberación de calor con el objetivo de analizar el efecto de la adición de OME_X en diferentes proporciones. Como se puede observar en la figura 4.5.(a), apenas se muestran diferencias en la liberación de calor, salvo en lo que respecta a los picos máximos durante la inyección principal de combustible, los cuales han aumentado ligeramente a medida que ha aumentado la cantidad de OME_X en la mezcla. Esta tendencia, en cambio, no se ve reflejada en la segunda inyección piloto, en la que no se aprecia una tendencia clara, salvo que cuanto mayor es la cantidad de OME_X en la mezcla, más reactiva es esta e inicia el proceso de combustión antes en el tiempo, puesto que la liberación de calor adquiere picos distintos y se inicia en diferentes instantes. Se puede considerar irrelevante, dado que, al trabajar con promedios, la medida no es exacta y no siempre se puede esperar obtener una tendencia clara.



(a) Curvas de tasa de liberación de calor promedio para la condición nominal (b) Curvas de KL promedio para la condición nominal



(c) Curvas de OH^* promedio para la condición nominal

Figura 4.5: Curvas promedio para la condición nominal

Por lo que respecta a las curvas de intensidad de KL, sí se observan diferencias considerables. Por un lado, resulta interesante mencionar que el instante en el que empieza a aparecer radiación asociada a la formación de hollín apenas varía, en cambio, se observan diferencias en cuanto al pico máximo ($10.3^{\circ}CAD$) y a la caída de las curvas. Para el caso de 30O70D, debido a que la cantidad de OME_X no es muy abundante, el pico máximo es ligeramente superior al de 100D,

aun así, a partir de este punto la tendencia a reducir la intensidad de la radiación de KL es clara, llegando a cero antes en el tiempo a medida que aumenta la proporción de OME_X en la mezcla. Se puede observar una reducción en el pico máximo del 19% para el caso 50O50D y del 73% para el caso 70O30D, respecto al combustible diésel puro. Se observa que para el caso 70O30D se obtiene una reducción sustancial en la intensidad de KL y también finaliza esta radiación notablemente antes, reduciendo su tiempo de exposición en un 50%. En cuanto a las curvas de OH^* , como es de esperar, se observa la tendencia opuesta: respecto al combustible diésel puro, el pico máximo durante la inyección principal aumenta prácticamente en la misma proporción para los casos 30O70D y 50O50D (25%) y en un 50% para el caso 70O30D. Del mismo modo, también se puede observar que, a medida que aumenta la concentración de oxígeno en el combustible, los procesos de oxidación finalizan antes, lo que puede traducirse en que un mayor contenido de OME_X en la mezcla conlleva procesos de oxidación más intensos y rápidos. Si se observa la segunda inyección piloto, se puede concluir que presenta una relación con la tasa de liberación de calor, pues a mayor concentración de oxígeno en la mezcla, antes se inician las reacciones de oxidación y antes finalizan, lo que se traduce en que la mezcla es más reactiva.

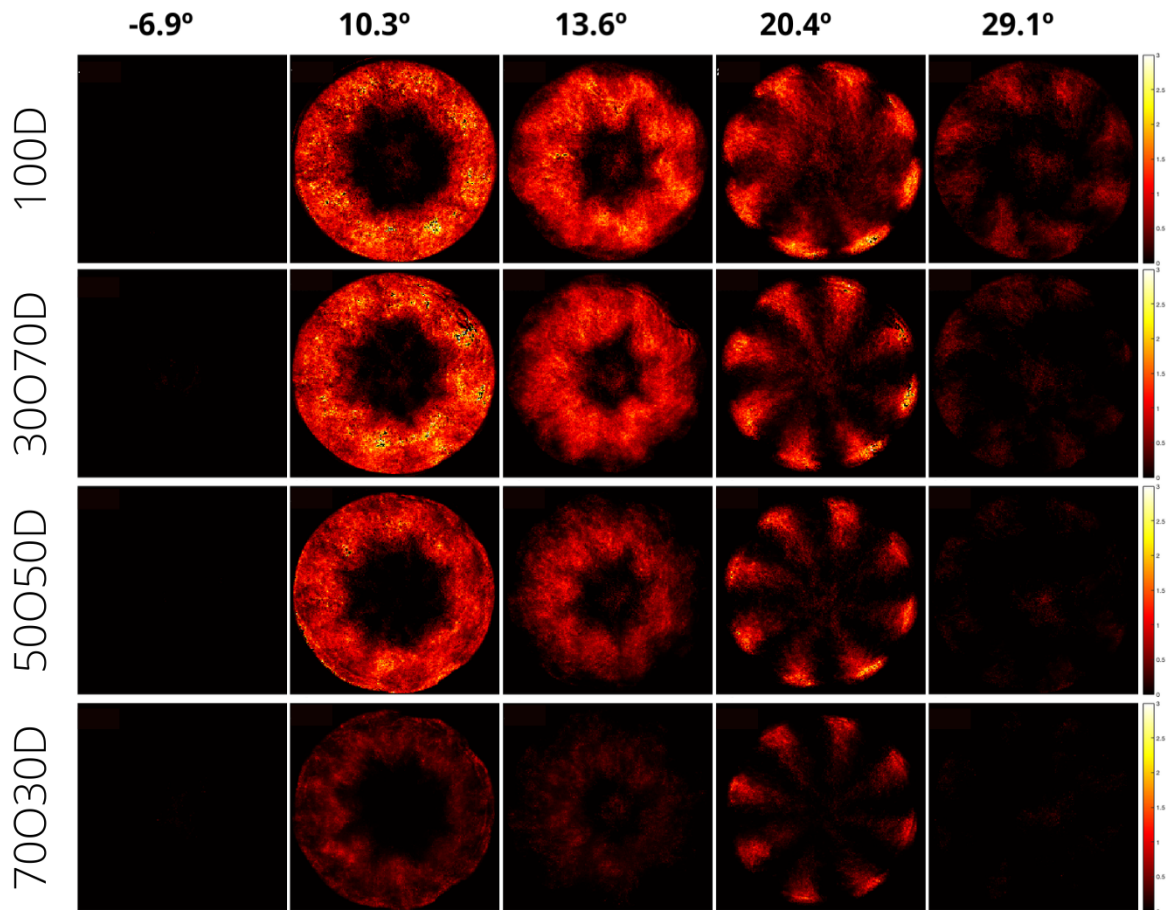


Figura 4.6: Imágenes de radiación de KL en el interior de la cámara de combustión (condición nominal)

Si se observan los marcos de la figura 4.6, es sencillo comparar la intensidad de KL asociada a la formación de hollín entre las tres mezclas de combustible utilizadas, así como con el caso en el que se emplea diésel puro (ver figura 4.2). Como se ha indicado, para 10.3°CAD se encuentran los picos máximos y se puede ver una notable diferencia en los niveles de intensidad promediados en el interior de la cámara de combustión. De ese instante en adelante, se observa una reducción relativamente proporcional de la intensidad y, en el instante 29.1°CAD se puede comprobar como la radiación de KL para los casos 50O50D y 70O30D es prácticamente inexistente. Resulta notable mencionar la importante reducción que se consigue en el caso de emplear un 70% de

OME_X en la mezcla, puesto que la intensidad de KL, incluso en el momento máximo, se reduce drásticamente frente a los otros combustibles. Por lo que respecta a la radiación de

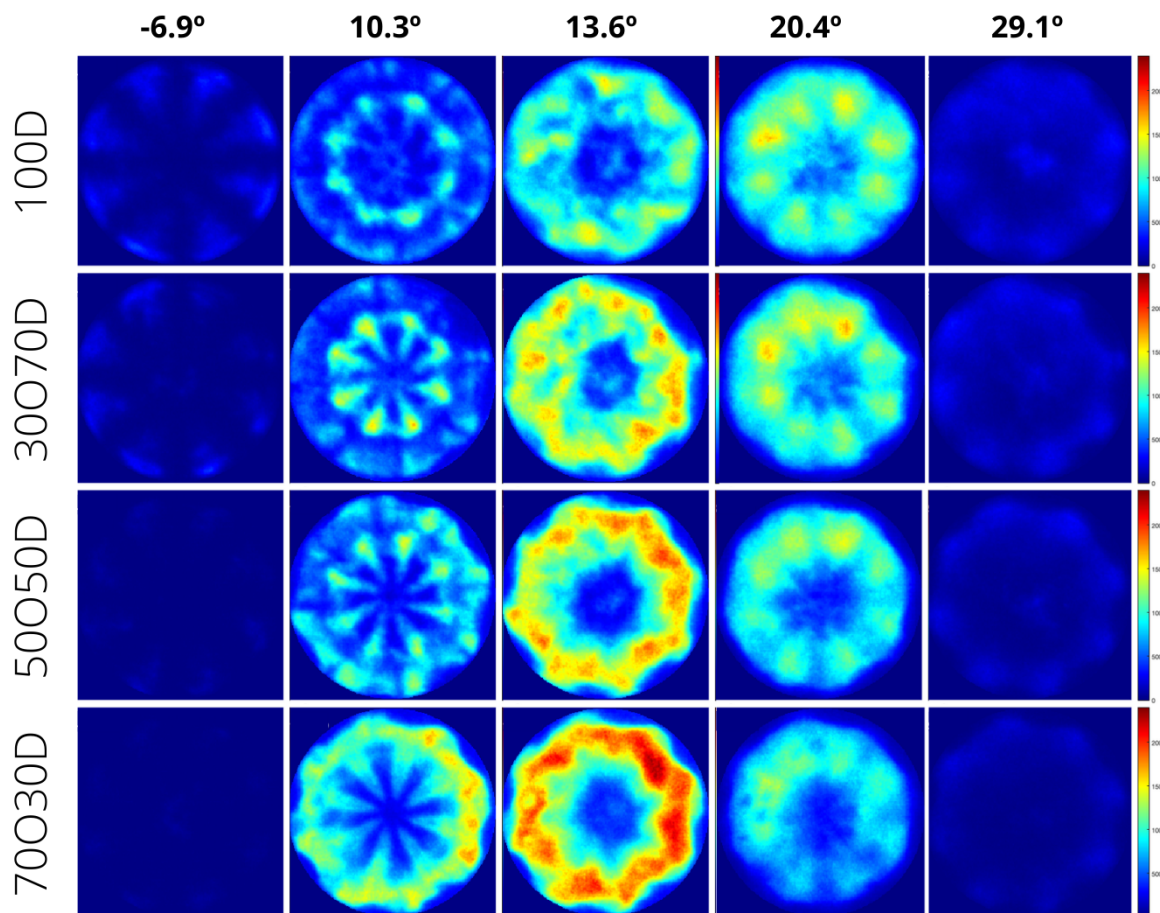
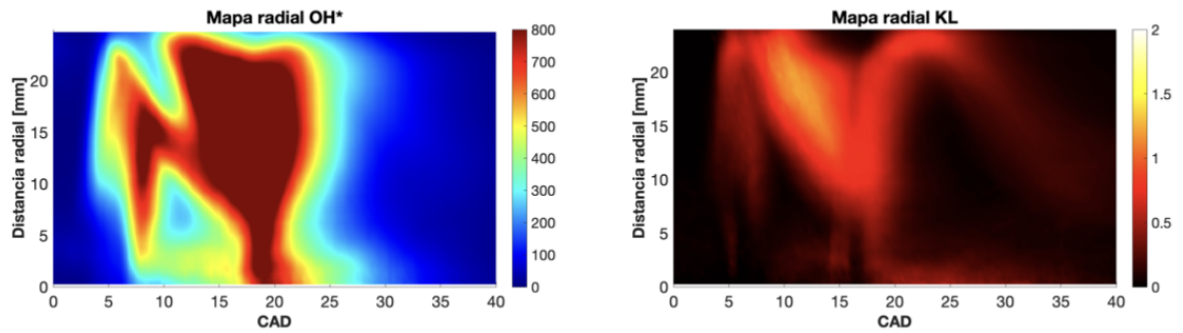


Figura 4.7: Imágenes de quimioluminiscencia de OH* en el interior de la cámara de combustión (condición nominal)

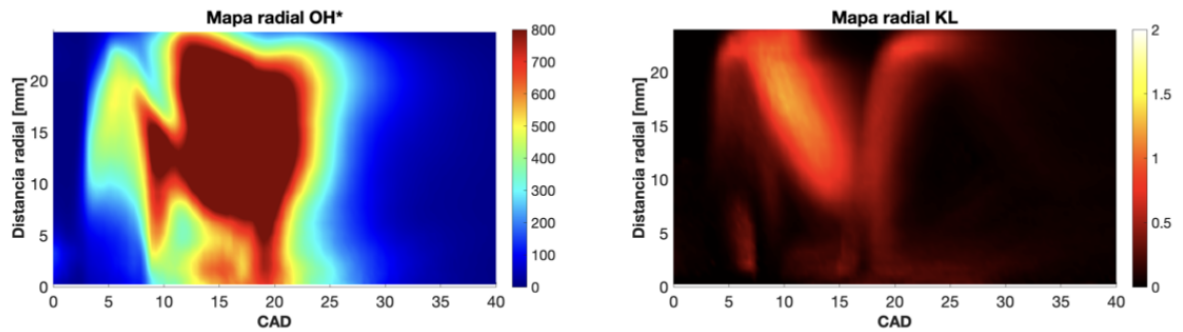
quimioluminiscencia de OH*, es sencillo comparar las diferencias en la figura 4.7, ya que para una misma condición nominal se muestran todas las imágenes en el mismo rango dinámico, siendo en este caso la escala de colores entre valores de 0 y 2400. Para -6.9°CAD se observa una ligera radiación asociada a procesos de oxidación de algunos precursores del hollín, inexistente en el caso de 70030D debido a que tienen lugar con anterioridad. Se puede observar que, claramente, a mayor cantidad de OME_X en la mezcla, mayor intensidad de radiación de OH*, la cual finaliza antes. Esto se traduce, como se ha indicado al analizar las curvas, en un mejor proceso de oxidación de las partículas de hollín durante el proceso de combustión, así como una reacción más rápida. Como se ha comentado en el apartado anterior, las zonas de reacción se aglutinan en la periferia del pistón, ligeramente separadas de la pared exterior. Si se observa el instante 10.3°CAD, es clara la diferencia para los cuatro combustibles: mientras que en el caso del diésel puro las reacciones de oxidación se están iniciando en la zona central del pistón, a medida que aumenta el contenido de OME_X la intensidad de la radiación aumenta y ya se está produciendo en la parte externa del *bowl*. En 13.6°CAD se observan los valores máximos de radiación y queda claro su aumento para el combustible con un 70% de OME_X. En la figura 4.8 se han representado los mapas radiales correspondientes a los diferentes ensayos referentes a la condición nominal, con el objetivo de detectar las zonas de oxidación de hollín principales. Se puede observar una disminución de radiación de KL en las zonas en las que la radiación de quimioluminiscencia de OH* es mayor, principalmente para ángulos CAD entre 13° y 20°.

Nominal (21%O₂)

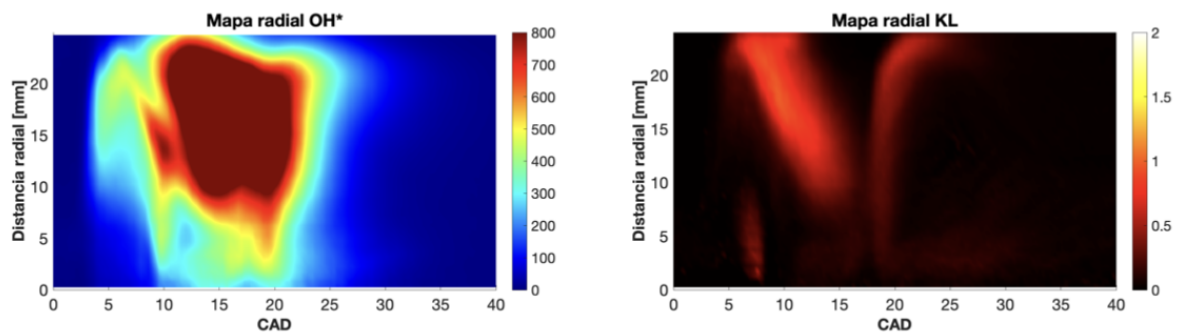
100D



30070D



50050D



70030D

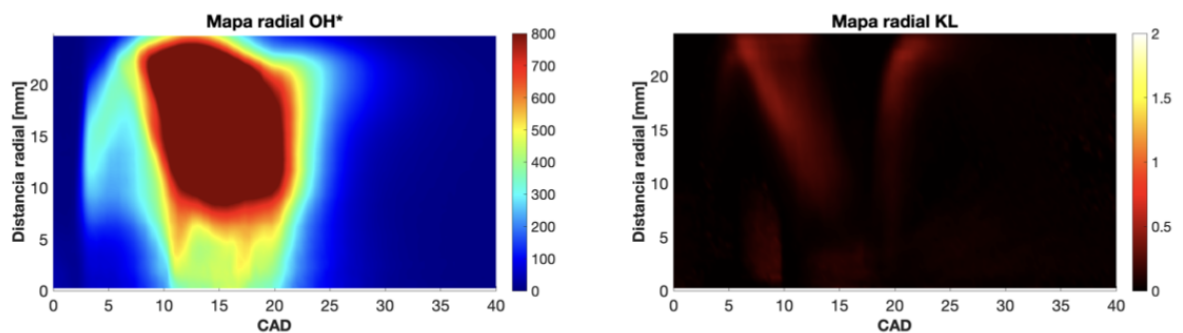


Figura 4.8: Mapas radiales de radiación KL y OH* para la condición nominal

De esta forma se puede mostrar la correlación entre mayor radiación de OH* y mayor oxidación de las partículas de hollín, como se ha comentado. Además, se puede analizar la distancia del centro del pistón a la que más se asocia la formación de hollín, así como el proceso de oxidación del mismo, centrándose entre 10 y 20 milímetros de promedio.

4.2.2 Condiciones de baja concentración de oxígeno

Debido a que en condiciones de EGR los sistemas de combustión se ven forzados a trabajar con bajas concentraciones de oxígeno, favoreciendo unas condiciones propicias para la formación de hollín y dificultando los procesos de oxidación de este, resulta interesante estudiar los efectos del *e-fuel* analizado para estas condiciones con el objetivo de concluir si este puede reducir la formación de hollín, a la vez que se están minimizando las emisiones de NO_x. Para ambos casos se ha decidido no representar la tasa de liberación de calor, pues las tendencias ya se han descrito, tanto para las diferentes condiciones de operación como para las diferentes mezclas de combustible. Por tanto, se inicia el análisis mediante las representaciones de las curvas de radiación de KL y quimioluminiscencia de OH* (ver figura 4.9).

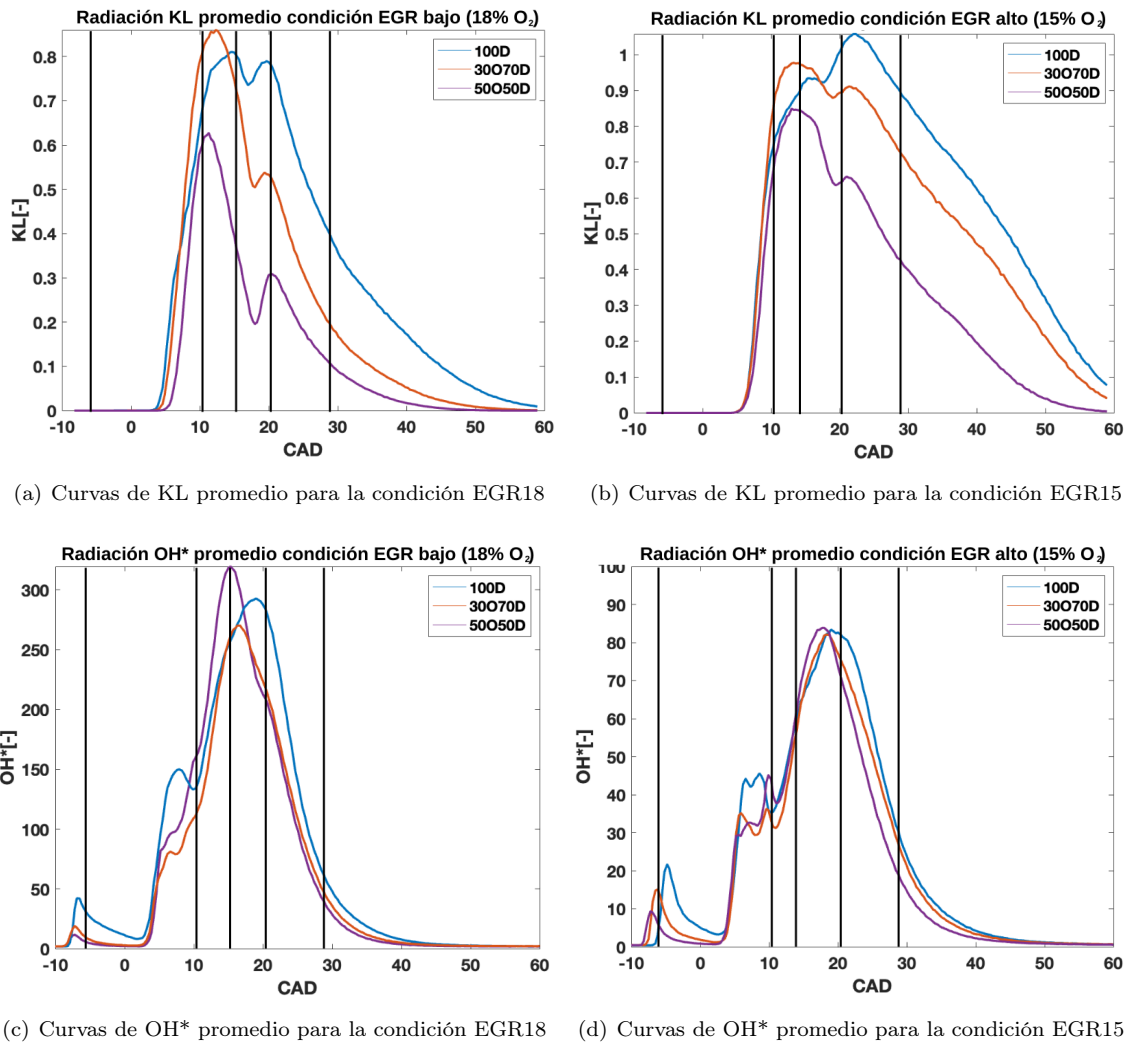
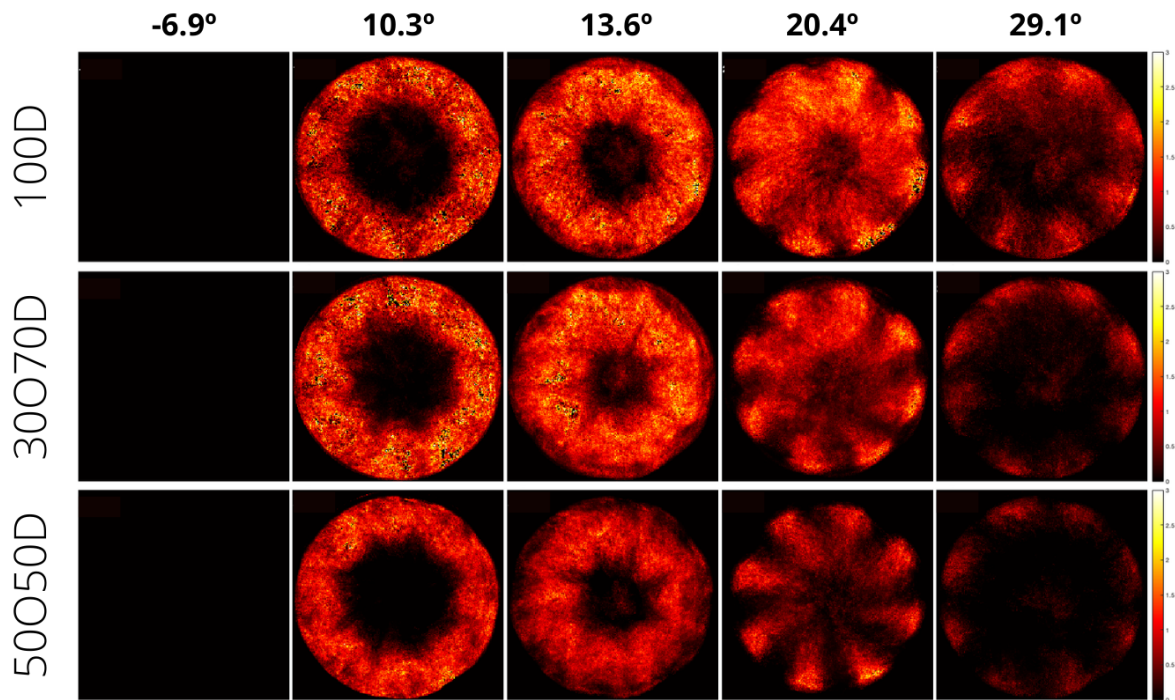
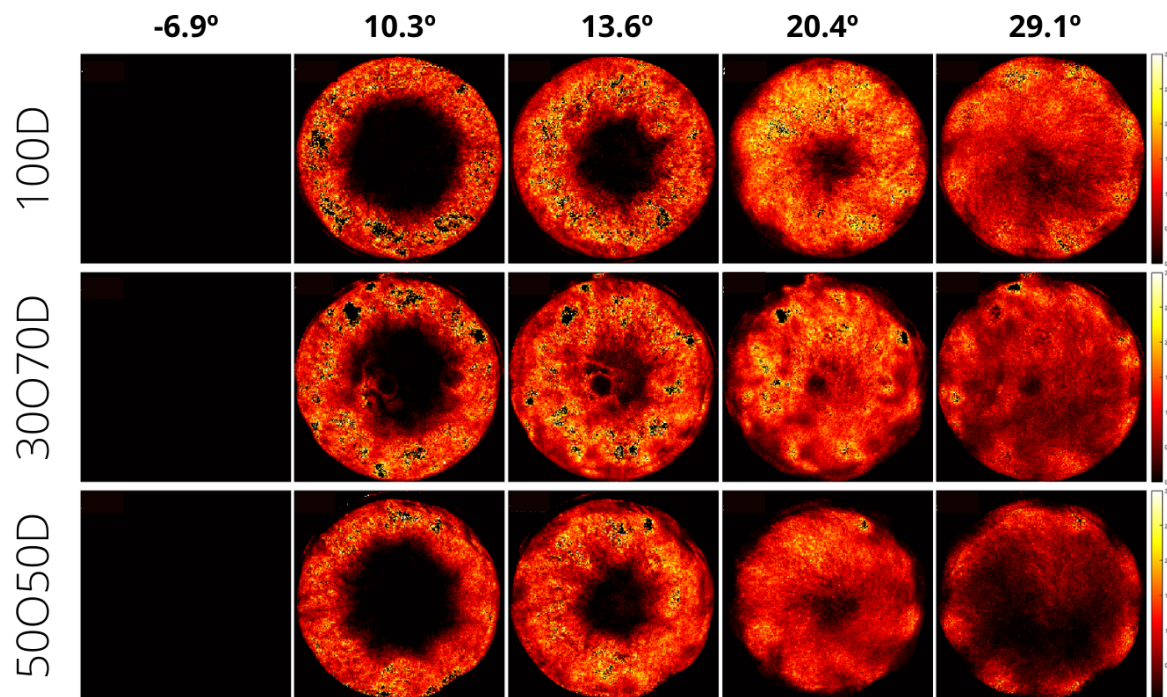


Figura 4.9: Curvas promedio para condiciones de baja concentración de oxígeno en la admisión

Por lo que respecta a la radiación de KL, al igual que para el caso nominal, se observa que cuanto mayor es la proporción de OME_x en la mezcla, se obtiene menor intensidad de radiación



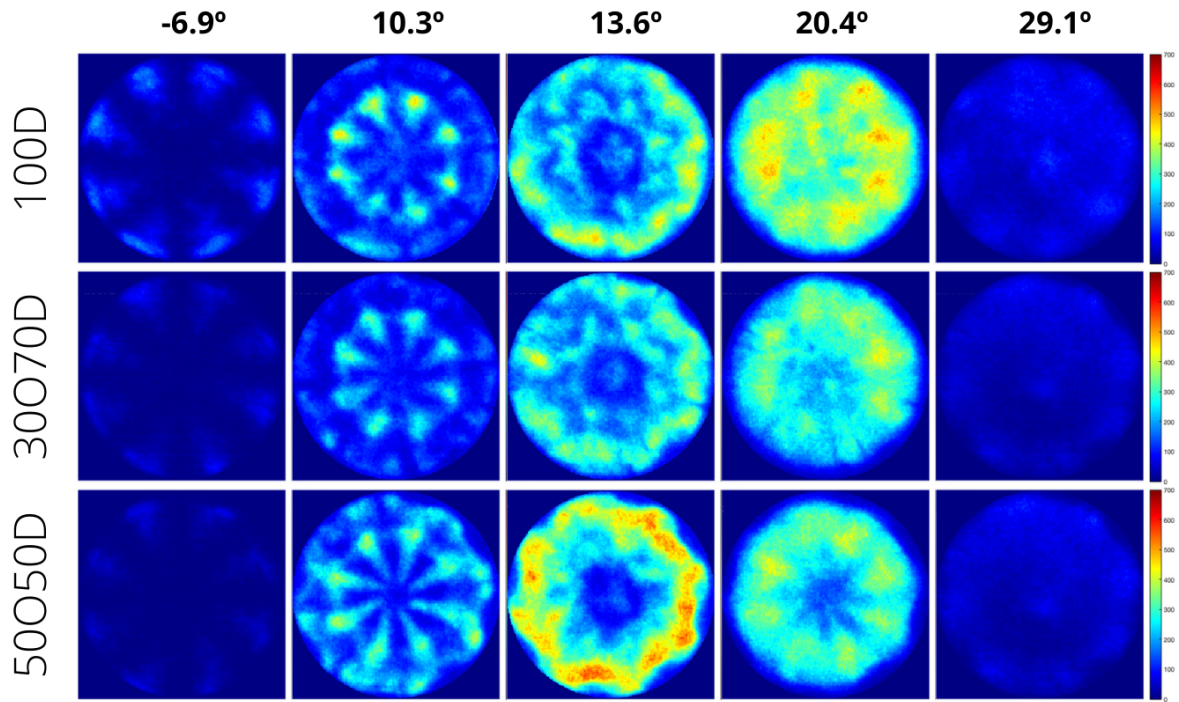
(a) EGR18



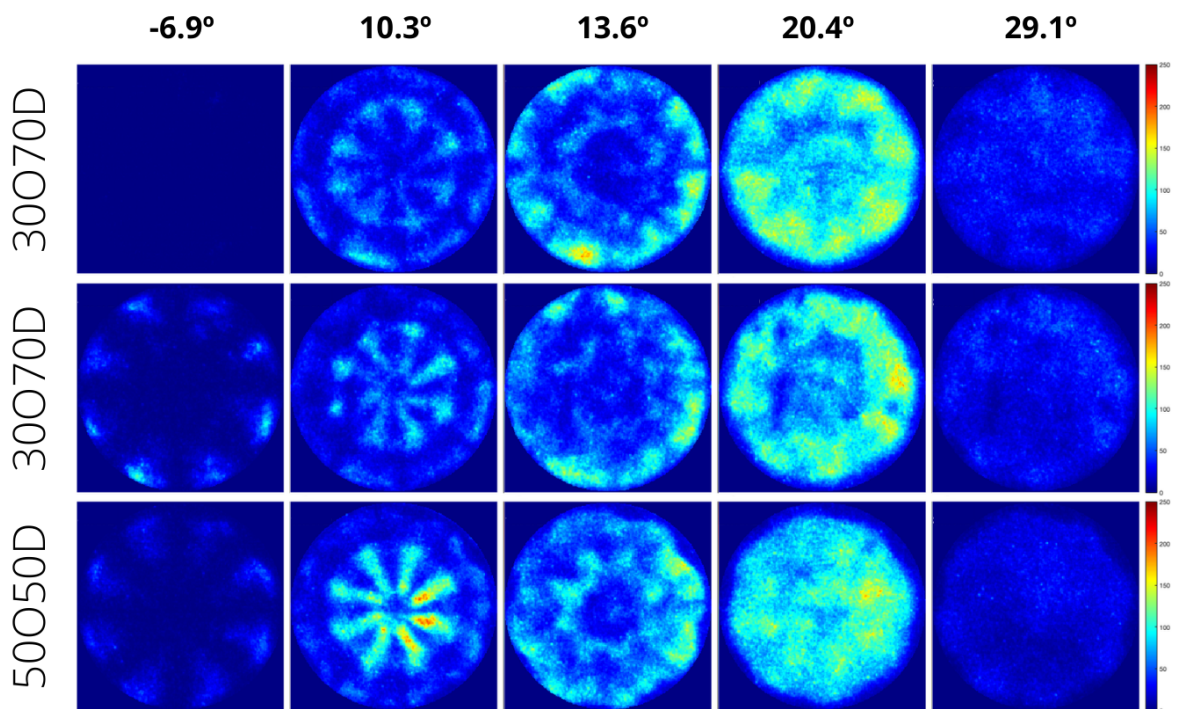
(b) EGR15

Figura 4.10: Imágenes de radiación de KL en el interior de la cámara de combustión

de KL, así como las curvas caen antes. Para los ensayos de 30070D del caso de bajo EGR se observa un pico máximo ligeramente superior al caso 100D, lo que puede deberse a que la cantidad de OME_X en la mezcla es baja. En cambio, para el caso de alto EGR sí se obtiene un menor pico máximo que para 100D. Una vez superado el pico, se muestra una clara disminución



(a) EGR18



(b) EGR15

Figura 4.11: Imágenes de radiación de OH* en el interior de la cámara de combustión

de la radiación. Para el caso de 18% de oxígeno, empleando un 50% de OME_X en la mezcla de combustible, es sencillo observar una reducción del pico máximo de casi un 25% respecto a 100D y una finalización del proceso de formación de hollín aún más rápida. También resulta interesante observar que, cuanto más OME_X , más se retrasa el inicio de radiación de KL

asociada a la formación de hollín. Para el caso de 15% de oxígeno, del mismo modo que para las condiciones anteriores, se confirma que a medida que aumenta la concentración de oxígeno en la estructura molecular del combustible, antes finaliza la radiación hollín.

En cuanto a las curvas de quimioluminiscencia de OH^* , se pueden observar en la representación ligeras diferencias que confirman los resultados obtenidos anteriormente. Por un lado, resulta interesante observar la radiación asociada a la segunda inyección piloto, la cual inicia ligeramente antes, siendo mayor cuanto menor es la cantidad de OME_X . Esto puede deberse a que, dado que una mayor cantidad de OME_X está asociada a una menor formación de hollín, existe menos radiación de OH^* , pues no existen tantos precursores del hollín que se deban oxidar en esa etapa. Sin embargo, pueden observarse diferencias interesantes en cuanto a la intensidad de la radiación durante la inyección principal, siendo la más representativa del uso del OME_X la mayor velocidad del proceso de combustión, pues se observa como las curvas con mayor concentración de OME_X finalizan antes. No se observa una mayor radiación de OH^* para el caso de 30O70D, lo que puede deberse a que la radiación en la longitud de onda del OH excitado está asociada no solo a los procesos de oxidación de hollín, sino también a un aporte residual de la radiación continua del hollín, que se puede considerar como un cuerpo gris que irradia siguiendo la ley de Planck, como se ha indicado en la subsección 2.2.2, y, a altas temperaturas puede tener un aporte no despreciable en el espectro ultravioleta que interfiera con la quimioluminiscencia del OH^* . A medida que aumenta la cantidad de OME_X en la mezcla, la presencia de oxígeno en el combustible evita, como se ha visto, la formación de hollín y, en consecuencia, la influencia del hollín sobre la radiación ultravioleta pierde importancia frente a la quimioluminiscencia del OH^* . Se puede observar, como principal correlación entre las curvas de intensidad de KL y OH^* , que cuanto más OME_X , antes finalizan las reacciones de oxidación.

Al igual que en los casos anteriores, en la figura 4.10 y la figura 4.11 se han representado los marcos del interior de la cámara de combustión para las mezclas de combustible utilizadas en estas condiciones de operación. Para el instante -6.9°CAD , durante la segunda inyección piloto, al igual que a lo largo de todo el trabajo, no se observa radiación asociada a la formación de hollín, por ser de una intensidad muy baja, pero sí se observa una ligera radiación de OH^* , como se ha visto al analizar las curvas. En 10.3°CAD se observan los marcos en los que el KL está aumentando y para el OH^* existen ligeras diferencias, aunque siguiendo la tendencia esperada ya comentada en apartados anteriores. Para 13.6°CAD , se hace evidente que, a medida que aumenta la concentración de OME_X en la mezcla, la radiación de KL es menor y comienza a disminuir de forma drástica y más rápida. Además, se confirma que, cuanto mayor proporción de OME_X , más rápidas son las reacciones de oxidación, pues, como se aprecia en los instantes 20.4°CAD y 29.1°CAD , a más cantidad de OME_X , menos radiación de KL, la cual desaparece antes, al igual que la radiación de OH^* . Como ya se ha indicado, la escala de las imágenes de OH^* está aumentada con el objetivo de analizar mejor la estructura de la radiación y, por tanto, las zonas de oxidación. El rango dinámico correspondiente a la baja tasa de EGR comprende los valores entre 0 y 700, mientras que para el caso de alta tasa de EGR, el rango dinámico comprende valores entre 0 y 250. Como era de esperar, las principales zonas de oxidación de hollín se encuentran concentradas en la periferia de la geometría del pistón, sin llegar a aprovecharse todo el oxígeno presente en la cámara de combustión, ya que en la zona central no se observa radiación en ningún instante.

Conclusiones

En el presente trabajo se han expuesto los principales problemas que representan para el planeta los actuales motores de combustión en cuanto a emisiones contaminantes. Se han desarrollado los conocimientos teóricos necesarios para comprender el funcionamiento de los motores de encendido por compresión, también llamados motores diésel, haciendo hincapié en la relevancia que estos tienen en los diferentes sectores, tanto industriales como particulares, y el proceso de combustión que tiene lugar en el interior de sus cámaras de combustión. Del mismo modo, se han expuesto las diferentes técnicas existentes de reducción de contaminantes, cómo estas se implementan y qué beneficios generan. Posteriormente, se ha realizado una introducción a los combustibles alternativos y se ha desarrollado su funcionamiento y potencial, centrándose en el OME_X.

A partir de una serie de ensayos previamente realizados en un motor óptico empleando técnicas ópticas, se han analizado las medidas registradas en forma de imágenes y señales de presión para diferentes condiciones de funcionamiento, simulando diferentes condiciones de recirculación de gases de escape y comparándolas con una condición de operación nominal, es decir, sin aplicar ninguna tasa de EGR. Del mismo modo, se han analizado los resultados de ensayos en los que se emplearon diferentes mezclas de combustible Diésel-OME_X, modificando las proporciones en la mezcla de cada uno de estos combustibles, con el objetivo de estudiar los cambios que se obtienen en lo que respecta a las emisiones de hollín y al proceso de combustión. Para ello, se han modificado rutinas de Matlab creadas en el departamento de Técnicas Ópticas del Centro de Motores Térmicos de la UPV y se han creado subrutinas que facilitarían los cálculos y representaciones. Mediante el análisis de estos resultados, en forma de gráficas, imágenes del interior de la cámara de combustión y mapas radiales, se pretende evaluar el potencial del *e-fuel* para sustituir el diésel fósil o bien reducir su uso, con todo lo que esto implica. Del estudio se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las curvas de tasa de liberación de calor muestran que, a medida que se aplica una tasa de EGR más elevada, menos combustible se quema durante las inyecciones piloto, permitiendo una liberación de calor mayor durante la inyección principal ligeramente desplazada hacia adelante en el tiempo. Del mismo modo, se ha demostrado que una mayor presencia de OME_X en la mezcla de combustibles no desplaza el instante de liberación de calor durante la inyección principal, aunque sí permite una mayor liberación de calor.

- Como era de esperar, tasas de EGR más altas, es decir, concentraciones más bajas de oxígeno en la admisión, se traducen en procesos con notablemente más formación de hollín, aunque procesos de oxidación más rápidos.
- Es necesario un aumento en la duración del pulso de inyección principal cuanto mayor es la cantidad de OME_X en la mezcla para conseguir una misma IMEP, lo que se traduce en un mayor consumo de combustible. Aun así, se ha demostrado que a medida que aumenta su presencia, el proceso de combustión es más rápido, es decir, finaliza antes.
- La técnica de pirometría de dos colores muestra que, a medida que aumenta la proporción de OME_X , para todos los casos estudiados, se obtiene una menor radiación asociada a la formación de hollín, lo que refuerza la idea de que el OME_X es un combustible que, como combustible puro, no produce hollín. Esto se explica por el alto contenido de oxígeno en la molécula, así como por la ausencia de enlaces C-C.
- Mediante la técnica de quimioluminiscencia de OH^* , se obtienen niveles de intensidad de radiación más elevados para las mezclas de combustible que contienen más cantidad de OME_X . Esto se debe, por una parte, a que la alta cantidad de oxígeno aumenta las zonas locales cercanas a las condiciones estequiométricas y aumenta la intensidad de OH^* y, por otra parte, a la baja formación de hollín, que permite una mejor visualización de la quimioluminiscencia OH^* . Se puede concluir que esta radiación está asociada a una alta concentración de este radical, el cual ayuda a oxidar el hollín, así como sus precursores durante las inyecciones piloto. De este modo, se observan procesos de oxidación más rápidos e intensos a medida que aumenta la proporción de OME_X en la mezcla de combustible.
- Mediante la representación de mapas radiales, que muestran intensidad de radiación en función de la distancia radial frente al ángulo CAD, se pueden correlacionar niveles de intensidad elevados de OH^* con zonas de baja intensidad de KL, debido al proceso de oxidación del hollín que representan los primeros.

A la vista de los resultados obtenidos, se puede concluir que el uso extendido del OME_X como aditivo al combustible diésel convencional resulta una alternativa viable que no requiere modificaciones en el motor, tanto en lo referente al sistema de inyección como en los materiales de construcción del mismo, siempre que no se utilice de forma pura, para reducir la dependencia de combustibles fósiles, así como reducir las emisiones de hollín y optimizar el proceso de combustión. Además, muestra un elevado potencial a la hora de aplicar tasas elevadas de EGR, como se ha visto, que permitan una reducción de emisiones de NO_X sin necesidad comprometer las emisiones de hollín. Una vez realizado el estudio, resulta interesante extender el análisis, planteando nuevos trabajos, como por ejemplo, empleando diferentes geometrías de pistón, complementándose con el uso de combustibles alternativos, ya que el uso de diferentes superficies, con más o menos protuberancias de diversas formas o geometrías, puede aportar resultados beneficiosos en lo que a emisiones de hollín y proceso de combustión se refiere. Sería interesante observar cómo varía la morfología de la llama y cómo esta se recircula con el objetivo de oxidar hollín en mayor medida, aprovechando de una forma optimizada el oxígeno presente en la cámara de combustión.

Una vez se han realizado las conclusiones pertinentes respecto al estudio realizado y se han indicado estos comentarios que abren puertas a nuevas investigaciones, se da por concluido el análisis de forma satisfactoria, pues se ha corroborado lo que era de esperar, llegando a obtener resultados más favorables de lo esperado.

Bibliografía

- [1] Jorge Castro. «Perspectivas de la demanda energética global». En: *Petrotecnia* 1 (2011). [\[Enlace\]](#), págs. 54-70 (vid. págs. 1, 2).
- [2] Max Roser Hannah Ritchie y Pablo Rosado. «Energy». En: *Our World in Data* (2020). [\[Enlace\]](#) (vid. págs. 1, 2).
- [3] Nabin Aryal y col. «Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading». En: (2021). [\[Enlace\]](#) (vid. pág. 1).
- [4] Suresh Kumar Krishnan, Senthilkumar Kandasamy y Kavitha Subbiah. «Fabrication of microbial fuel cells with nanoelectrodes for enhanced bioenergy production». En: *Nanomaterials*. [\[Enlace\]](#). Elsevier, 2021, págs. 677-687 (vid. pág. 2).
- [5] H Ritchie. *Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from?-Our world in data. Our World Data 2020: 2-6*. [\[Enlace\]](#) (vid. pág. 2).
- [6] Felix Leach y col. «The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines». En: *Transportation Engineering* 1 (2020). [\[Enlace\]](#), pág. 100005 (vid. pág. 2).
- [7] Rolf D Reitz y col. *IJER editorial: The future of the internal combustion engine*. [\[Enlace\]](#). 2020 (vid. págs. 3, 4).
- [8] Gautam Kalghatgi. «Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport?» En: *Applied energy* 225 (2018). [\[Enlace\]](#), págs. 965-974 (vid. pág. 4).
- [9] Stephen A Ciatti. «Compression ignition engines—revolutionary technology that has civilized frontiers all over the globe from the industrial revolution into the twenty-first century». En: *Frontiers in Mechanical Engineering* 1 (2015). [\[Enlace\]](#), pág. 5 (vid. págs. 5, 6).
- [10] Francisco Payri González y José M^a Desantes Fernández. *Motores de combustión interna alternativos*. Editorial Universitat politècnica de valencia, 2011 (vid. págs. 5, 6, 8, 10, 14-16, 20).

- [11] Felipe de Vargas Lewiski. «Analysis of the combustion process and soot formation in a single cylinder optical engine fueled with e-fuels and using different piston geometries». [\[Enlace\]](#). Tesis doct. Universitat Politècnica de València, 2021 (vid. págs. 8-11, 18, 26).
- [12] Klaus Mollenhauer, Helmut Tschöke y Krister GE Johnson. *Handbook of diesel engines*. Vol. 1. [\[Enlace\]](#). Springer Berlin, 2010 (vid. págs. 8-12).
- [13] Xuan Phuong Pham. «Influences of molecular profiles of biodiesels on atomization, combustion and emission characteristics». En: (2014). [\[Enlace\]](#) (vid. pág. 9).
- [14] Urban Žvar Baškovič. «Advanced combustion concepts with innovative waste derived fuels». [\[Enlace\]](#). Tesis doct. [U. Žvar Baškovič], 2019 (vid. págs. 9, 10).
- [15] John E Dec. «A conceptual model of DL diesel combustion based on laser-sheet imaging». En: *SAE transactions* (1997), págs. 1319-1348 (vid. pág. 11).
- [16] Dale R Tree y Kenth I Svensson. «Soot processes in compression ignition engines». En: *Progress in energy and combustion science* 33.3 (2007). [\[Enlace\]](#), págs. 272-309 (vid. págs. 11, 12).
- [17] Toyota. *¿Qué es la normativa EURO 6?* [\[Enlace\]](#). 3 de Julio de 2022 (vid. pág. 12).
- [18] DieselInformation. *¿Cuál es la normativa para los vehículos Diésel y cómo se aplica?* [\[Enlace\]](#). 3 de Julio de 2022 (vid. págs. 12, 13).
- [19] Reglamento (UE) 2017/1154 de la Comisión, de 7 de junio de 2017, que modifica el Reglamento (UE) 2017/1151, que complementa el Reglamento (CE) n.º 715/2007 del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre la homologación de tipo de los vehículos de motor por lo que se refiere a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 5 y Euro 6) y sobre el acceso a la información relativa a la reparación y el mantenimiento de los vehículos, modifica la Directiva 2007/46/CE del Parlamento Europeo y del Consejo y los Reglamentos (CE) n.º 692/2008 y (UE) n.º 1230/2012 de la Comisión y deroga el Reglamento (CE) n.º 692/2008 de la Comisión y la Directiva 2007/46/CE del Parlamento Europeo y del Consejo en lo que concierne a las emisiones en condiciones reales de conducción procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 6). www.boe.es/doue/2017/175/L00708-00732.pdf. [\[Enlace\]](#) (vid. pág. 13).
- [20] Álvaro Prieto Amaya (24 Septiembre, 2021). *Actual normativa europea de emisiones Euro 6: ¿Qué traerá en breves la Euro 7?* [\[Enlace\]](#). 3 de Julio de 2022 (vid. págs. 13, 14).
- [21] AECC. *Development of european light-duty emissions limits*. [\[Enlace\]](#). 4 de Julio de 2022 (vid. pág. 14).
- [22] S Narayan, Sasa Milojevic y Vipul Gupta. «Combustion monitoring in engines using accelerometer signals». En: *Journal of Vibroengineering* 21.6 (2019). [\[Enlace\]](#), págs. 1552-1563 (vid. págs. 14-16).
- [23] José V Pastor y col. «Effect of a novel piston geometry on the combustion process of a light-duty compression ignition engine: An optical analysis». En: *Energy* 221 (2021). [\[Enlace\]](#), pág. 119764 (vid. pág. 15).

-
- [24] José V Pastor y col. «Soot reduction for cleaner Compression Ignition Engines through innovative bowl templates». En: *International Journal of Engine Research* 22.8 (2021). [\[Enlace\]](#), págs. 2477-2491 (vid. pág. 15).
- [25] Gurpreet Singh. «Overview of the DOE advanced combustion engine R&D». En: *DOE hydrogen program and vehicle technologies program, annual merit review, Washington, DC* (2010). [\[Enlace\]](#) (vid. pág. 16).
- [26] José V Pastor y col. «An optical investigation of Fischer-Tropsch diesel and Oxymethylene dimethyl ether impact on combustion process for CI engines». En: *Applied Energy* 260 (2020). [\[Enlace\]](#), pág. 114238 (vid. págs. 16, 18, 23).
- [27] José V Pastor y col. «Experimental study of the effect of hydrotreated vegetable oil and oxymethylene ethers on main spray and combustion characteristics under engine combustion network spray a conditions». En: *Applied Sciences* 10.16 (2020). [\[Enlace\]](#), pág. 5460 (vid. pág. 16).
- [28] Choongsik Bae y Jaeheun Kim. «Alternative fuels for internal combustion engines». En: *Proceedings of the Combustion Institute* 36.3 (2017). [\[Enlace\]](#), págs. 3389-3413 (vid. págs. 16, 17).
- [29] Peng Geng y col. «Effects of alternative fuels on the combustion characteristics and emission products from diesel engines: A review». En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 71 (2017). [\[Enlace\]](#), págs. 523-534 (vid. pág. 17).
- [30] Antonio Tricas Aizpun y Alessandro Marotta. *State of the Art on Alternative Fuels Transport Systems in the European Union*. [\[Enlace\]](#). Joint Research Center, DG Mobility y Transport, 2020 (vid. pág. 17).
- [31] Jose V Pastor y col. *Combustion Behaviour of Blends of Synthetic Fuels in an Optical Single Cylinder Engine*. Inf. téc. [\[Enlace\]](#). SAE Technical Paper, 2021 (vid. págs. 18, 19, 29).
- [32] Florian Ausfelder y Kurt Wagemann. «Power-to-Fuels: E-Fuels as an Important Option for a Climate-Friendly Mobility of the Future». En: *Chemie ingenieur technik* 92.1-2 (2020). [\[Enlace\]](#), págs. 21-30 (vid. págs. 18, 19).
- [33] Björn Lumpp y col. «Oxymethylene ethers as diesel fuel additives of the future». En: *MTZ worldwide eMagazine* 72.3 (2011). [\[Enlace\]](#), págs. 34-38 (vid. pág. 18).
- [34] Jesús Benajes y col. «Potential of using OME_x as substitute of diesel in the dual-fuel combustion mode to reduce the global CO₂ emissions». En: *Transportation Engineering* 1 (2020). [\[Enlace\]](#), pág. 100001 (vid. págs. 18, 19).
- [35] Christophe J Baranowski, Ali M Bahmanpour y Oliver Kröcher. «Catalytic synthesis of polyoxymethylene dimethyl ethers (OME): A review». En: *Applied Catalysis B: Environmental* 217 (2017). [\[Enlace\]](#), págs. 407-420 (vid. págs. 18, 19).
- [36] José V Pastor y col. «Simultaneous high-speed spectroscopy and 2-color pyrometry analysis in an optical compression ignition engine fueled with OME_x-diesel blends». En: *Combustion and Flame* 230 (2021). [\[Enlace\]](#), pág. 111437 (vid. pág. 18).
-

- [37] Leonardo Pellegrini y col. «Combustion behaviour and emission performance of neat and blended polyoxymethylene dimethyl ethers in a light-duty diesel engine». En: *SAE 2012 World Congress & Exhibition*. 2012-01-1053. [\[Enlace\]](#). 2012 (vid. págs. 18, 19).
- [38] Jesús Benajes y col. «Clean and efficient dual-fuel combustion using OME_x as high reactivity fuel: Comparison to diesel-gasoline calibration». En: *Energy Conversion and Management* 216 (2020). [\[Enlace\]](#), pág. 112953 (vid. pág. 19).
- [39] Alfred Leipertz y Michael Wensing. «Modern optical diagnostics in engine research». En: *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 85. 1. [\[Enlace\]](#). IOP Publishing. 2007, pág. 012001 (vid. págs. 19, 20, 23).
- [40] Fundamentos de las técnicas Ópticas. (2020). Pastor, José V and Broatch, Jaime Alberto (Comp.) *Ensayos en Sistemas Propulsivos. Tema 8*. Universitat Politècnica de València (vid. págs. 20-23).
- [41] Luis Arias y col. «Photodiode-based sensor for flame sensing and combustion-process monitoring». En: *Applied optics* 47.29 (2008). [\[Enlace\]](#), págs. 5541-5549 (vid. págs. 21, 22).
- [42] José V Pastor y col. «Methodology for optical engine characterization by means of the combination of experimental and modeling techniques». En: *Applied Sciences* 8.12 (2018). [\[Enlace\]](#), pág. 2571 (vid. pág. 23).
- [43] Jose V Pastor y col. *PIV and DBI Experimental Characterization of Air Flow-Spray Interaction and Soot Formation in a Single Cylinder Optical Diesel Engine Using a Real Bowl Geometry Piston*. Inf. téc. [\[Enlace\]](#). SAE Technical Paper, 2019 (vid. pág. 23).
- [44] José Vicente Pastor Soriano y col. «Comparison of the Diffusive Flame Structure for Dodecane and OME_x Fuels for Conditions of Spray A of the ECN». En: *SAE Technical Papers* (2020). [\[Enlace\]](#) (vid. pág. 28).
- [45] Zhicong Li, Chun Lou y Benjamin M Kumfer. «Revealing the competitive relationship between soot formation and chemiluminescence». En: *Combustion and Flame* 245 (2022). [\[Enlace\]](#), pág. 112335 (vid. pág. 31).
- [46] Hoyt C Hottel y FP Broughton. «Determination of true temperature and total radiation from luminous gas flames». En: *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition* 4.2 (1932). [\[Enlace\]](#), págs. 166-175 (vid. pág. 32).

Apéndice A

KL_Image_Processed.m

```
%% PROCESADO IMAGENES KL
% Adrian Gutierrez Viña
% Curso 2021-2022

clc;
clearvars;
close all;
warning 'off';

%% Datos
bowltest = {'Reentrant'};
fueltest = {'30070D', '100D', '70030D', '50050D'};

%% Preparacion
cd('/Volumes/GUTI/TFG/Técnicas Ópticas/Ensayos');
for i = 1:length(bowltest)
    bowl = char(bowltest(i));
    disp([bowl, 'Piston']);
    if exist(['/Volumes/GUTI/TFG/Técnicas Ópticas/Ensayos/', bowl, ...
            'Piston'], "dir")
        cd(['/Volumes/GUTI/TFG/Técnicas Ópticas/Ensayos/', bowl, 'Piston']);
        for j = 1:length(fueltest)
            fuel = char(fueltest(j));
            disp(fuel);
            if exist(['/Volumes/GUTI/TFG/Técnicas Ópticas/Ensayos/', ...
                    bowl, 'Piston/', fuel], "dir")
                cd(['/Volumes/GUTI/TFG/Técnicas Ópticas/Ensayos/', bowl, ...
                    'Piston/', fuel, '/Procesado 2C/6bar/Results_MAPs']);
                condicion = dir;
                condicion(1:2) = [];
                for l = 1:length(condicion)
                    condicionname = condicion(l).name;
                    disp(condicionname);
                    cd(['/Volumes/GUTI/TFG/Técnicas Ópticas/Ensayos/', ...
                        bowl, 'Piston/', fuel, '/Procesado 2C/6bar/...
                            Results_MAPs/', condicionname, '/Procesado']);
                    test = dir;
                    test(1:2) = [];
                end
            end
        end
    end
end
```



```

for k = 1:length(test)
    if contains(test(k).name, '.mat')
        load(test(k).name);
    end
end
for ll = 1:10
    display(['Repetición ', num2str(ll), '_', ...
            condicionname]);
    figure('Color', 'white', 'Visible', 'off');
    for g = 1:length(CAD_vector)
        imshow(RadialRadRep.Maps(g).KLcorrect(:, :, ...
            ll), []);
        mask = drawcircle('Center', ...
            [140.7585910652921 140.3964776632303], ...
            'Radius', 117.7922237355576, ...
            'visible', 'off');
        Geometry.KL.Radius = mask.Radius;
        Geometry.KL.Center = mask.Center;
        KL.CAD(g) = round(CAD_vector(g), 1);

        % Se crea la mascara haciendo NaN
        % fuera de ella
        BW = createMask(mask);
        BWmask = double(BW);
        BWmask(BWmask==0) = NaN;

        % Se crea la estructura para todos los frames
        % de cada repeticion
        Rep.KL.Images(ll).mask(:, :, g) = ...
            RadialRadRep.Maps(g).KLcorrect(:, :, ll) ...
            .*BWmask;
        % Se aplica la mascara a la imagen oficial
        Rep.KL.Images(ll).Acc(g) = ...
            sum(sum(Rep.KL.Images(ll).mask(:, :, g), ...
                "omitnan"), "omitnan");
        % Intensidad acumulada de cada frame para
        % cada repeticion
        Rep.KL.Images(ll).Mean(g) = ...
            mean(mean(Rep.KL.Images(ll).mask(:, :, g), ...
                "omitnan"), "omitnan");

        % Recorte
        Posicion = mask;
        Rep.KL.Images(ll).Crop(:, :, g) = imcrop...
            (Rep.KL.Images(ll).mask(:, :, g), ...
            [Posicion.Center(1)-Posicion.Radius...
            Posicion.Center(2)-...
            Posicion.Radius...
            2*Posicion.Radius...
            2*Posicion.Radius]);
    end
end

Rep.KL.Images = rmfield(Rep.KL.Images, {'mask'});

MeanImage = zeros (length(Rep.KL.Images(1).Crop...
    (:, 1, 1)), length(Rep.KL.Images(1).Crop(1, :, 1)));
AccImage = zeros (length(Rep.KL.Images), ...
    length(Rep.KL.Images(1).Crop(1, 1, :)));
AvgImage = zeros (length(Rep.KL.Images), ...
    length(Rep.KL.Images(1).Crop(1, 1, :)));
for f = 1:length(Rep.KL.Images(1).Crop(1, 1, :))

```

```

        for d = 1:length(Rep.KL.Images)
            MeanImage(:,:,f,d) = ...
                Rep.KL.Images(d).Crop(:,:,f);
            AccImage(d,f) = Rep.KL.Images(d).Acc(f);
            AvgImage(d,f) = Rep.KL.Images(d).Mean(f);
        end
    end
    KL.AverageImages = mean(MeanImage,4,"omitnan");
    KL.AccStd = std(AccImage);
    KL.AvgStd = std(AvgImage);

    % Curva de intensidad acumulada y promedio de las
    % imagenes promediadas.
    for f = 1:length(KL.AverageImages(1,1,:))
        KL.AccAvg(f) = sum(sum(KL.AverageImages(:,:,f),...
            "omitnan"),"omitnan");
        KL.MeanAvg(f) = mean(mean(KL.AverageImages...
            (:,:,f),"omitnan"),"omitnan");
    end

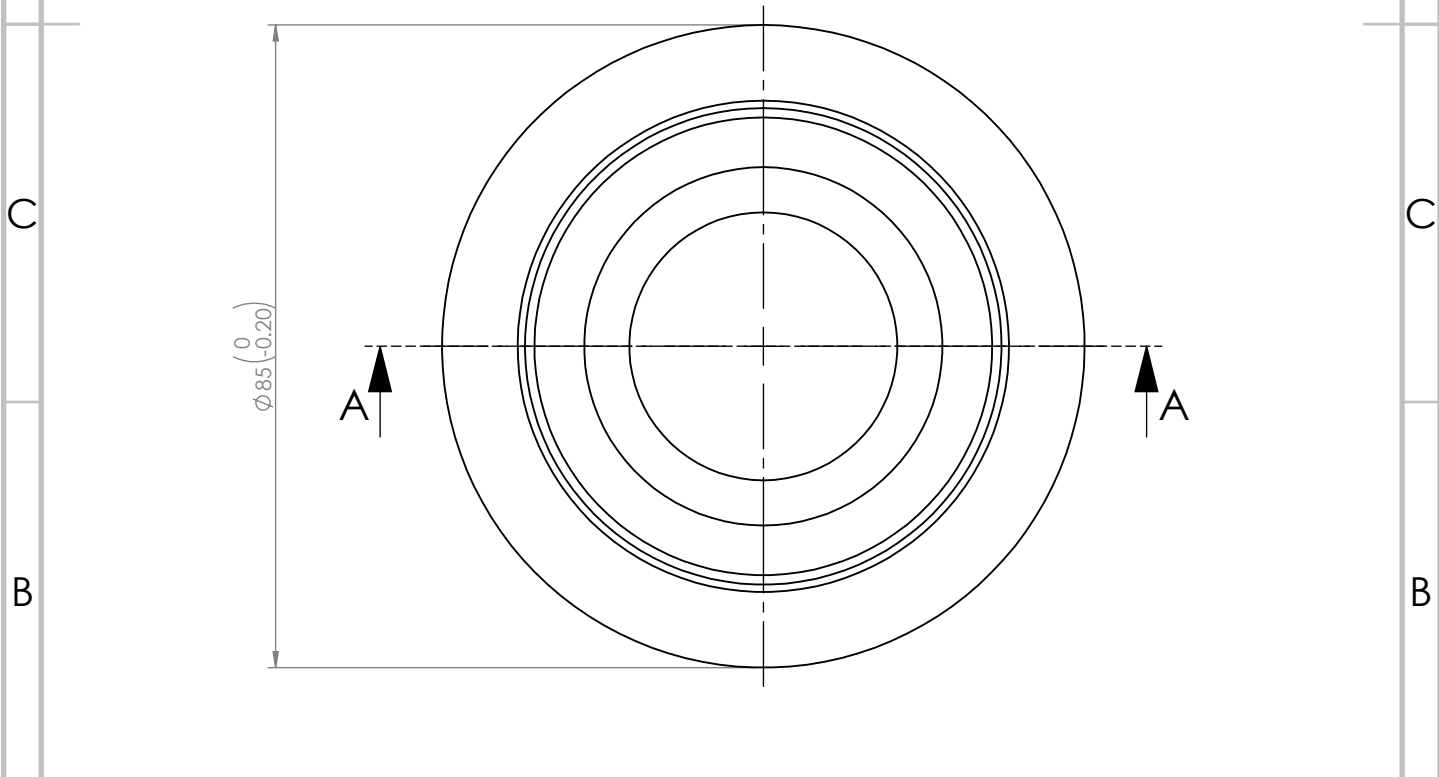
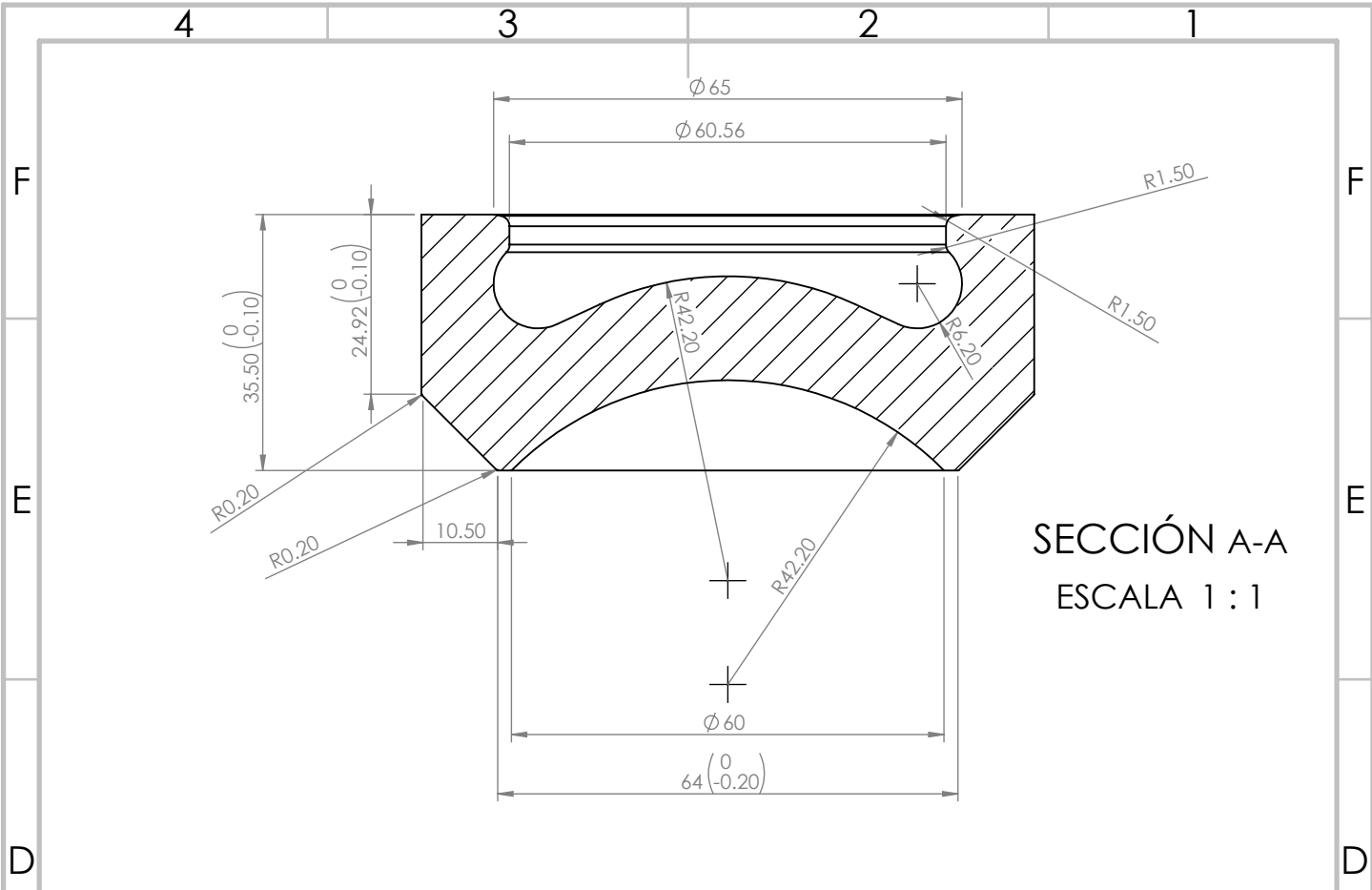
    % Valor maximo de intensidad de cada frame
    for h = 1:length(KL.AverageImages(1,1,:))
        KL.MaxAverageImages(h) = ...
            max(max(KL.AverageImages(:,:,h)));
    end

    % Crear y guardar estructuras .mat
    save('KL.mat','KL','-v7.3');
    save('Geometry.mat','Geometry','-v7.3');

    % Crear y guardar imagenes finales:
    mkdir('Images');
    cd([pwd,'/Images']);
    h = figure('Color','white','Visible','on');
    for g = 1:length(KL.AverageImages(1,1,:))
        imshow(KL.AverageImages(:,:,g),[0 3],...
            'InitialMagnification',300);
        colormap hot;
        colorbar;
        text(1,20,[num2str(KL.CAD(g)),'CAD'],'Color',...
            'white','FontWeight','bold','FontSize',14);
        export_fig(h,[num2str(g),'_KL.png']);
        saveas(h,[num2str(g),'_KL.fig']);
    end
end
end
end
end
end

```


Planos



AUTOR:		MATERIAL: Cuarzo		PROYECTO:	
		FECHA: 25/10/2019		Duramax	
		ESCALA: 1:1		TÍTULO: Pistón base line	
		HOJA 1 DE 1		A4	

Presupuesto

Introducción

En el presente documento se detallan los costes asociados a la realización del estudio, teniendo en cuenta que se ha partido de unos ensayos previamente realizados, por lo que el material registrado se ha proporcionado para realizar su correspondiente procesado y post-procesado. Es necesario tener en cuenta que el estudio se ha realizado en el contexto de formación académica, por lo que los costes asociados a horas trabajadas se han reducido respecto al tiempo dedicado para la realización del trabajo, pues no se computa el tiempo dedicado a solucionar errores durante el procesado y el aprendizaje del software empleado. Se considera que, en condiciones reales, en un centro de investigación, la realización del proyecto supondrá un tiempo de trabajo de dos meses (320 horas). Los costes indirectos suponen un 25% de los costes totales, como se estipula en el Programa Marco de Investigación e Innovación Horizonte Europa. En estos costes se incluyen los correspondientes a conexión a internet, limpieza de oficinas y laboratorios y el material de oficina básico, entre otros. Dichos costes se desglosan en:

- Costes directos
 - Costes de personal
 - Costes fungibles
 - Costes de equipamiento

- Costes indirectos

En cuanto al coste de licencias de software, se ha incluido en el grupo *Costes de equipamiento* y se corresponde con el valor de precio de venta a usuarios. Los costes de personal se han extraído del portal de transparencia de la UPV y el portal abierto *glassdoor.es*. Por lo que respecta a los costes fungibles, se consideran de coste cero, pues el único material necesario es el material básico de oficina, que se incluye en los costes indirectos, como ya se ha comentado.

Desarrollo del presupuesto

Costes directos

Costes de personal

Para la realización de este estudio, únicamente se dispondrá de un ingeniero de software o programador, encargado de desarrollar el código necesario para el procesado y post-procesado de la información proporcionada; un ingeniero encargado del desarrollo conceptual del análisis, capaz de analizar dichos resultados, así como extraer las conclusiones finales, y un supervisor que se encargue de la dirección del estudio, propuestas de mejora y detección de posibles errores.

Mano de obra	Horas trabajadas	Coste unitario [€/h]	Coste total [€]
Programador	120	15.62	1874.40
Ingeniero	160	13.00	2080.00
Supervisor	40	22.45	898.00
Subtotal			4852.40

Figura A.1: Costes de personal

Costes fungibles

Para la correcta realización del estudio, se hace uso de material básico de oficina, como son una libreta y bolígrafos. El coste de estos materiales fungibles se engloba en los costes indirectos.

Costes de equipamiento

En este apartado se muestran los costes asociados a la adquisición del material necesario para la realización del estudio. Esto es: un ordenador y licencias de software de carácter académico. Se ha tenido en cuenta que la vida media de un ordenador DELL es de 5 años y que para el estudio se utilizaría durante dos meses y medio, es decir, durante un 5% de su vida media. Del mismo modo, por lo que respecta a las licencias de software, se ha calculado la parte proporcional de uso respecto a la duración de la licencia. Se ha empleado Matlab, Dewesoft y Overleaf para el desarrollo del estudio.

Equipamiento	Concepto	Cantidad	Coste unitario [€/ud]	Coste total [€]
OptiPlex 3280 AIO (DELL)	Ordenador de sobremesa	0.034	1181.74	40.18
MATLAB_R2021b	Licencia académica anual individual	0.16666	250.00	41.66
Dewesoft 2022	Software procesamiento	1	0.00	0.00
Overleaf	Herramienta en línea	1	0.00	0.00
Subtotal				81.84

Figura A.2: Costes de equipamiento

Costes indirectos

Como se ha indicado, representan el 25% de los costes totales, lo que equivale a 392.73€.

Presupuesto final

TIPO DE COSTE	COSTE TOTAL [€]
Costes directos	4944.24
Costes indirectos (25% de directos)	1236.06
TOTAL	6180.30

Figura A.3: Presupuesto final

