



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

ESTUDIO DEL ENCENDIDO POR PLASMA DE MEZCLAS DE GASOLINA Y DIÉSEL Y SU INFLUENCIA SOBRE EL DESARROLLO DE LA COMBUSTIÓN Y FORMACIÓN DE CONTAMINANTES

TRABAJO FINAL DEL

Grado en Ingeniería Mecánica

REALIZADO POR

Óscar Bori Fabra

TUTORIZADO POR

José Vicente Pastor Soriano

Carlos Micó Reche

FECHA: Valencia, septiembre, 2019

*A mi hermano y mis padres.
En memoria de mis abuelos,
Francisco Bori y Eugenio Fabra.*

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a todas aquellas personas que han formado parte de mi vida durante el período universitario, por apoyarme y por los buenos momentos que hemos pasado juntos.

Agradecer al instituto universitario CMT-Motores Térmicos, a mi tutor José Vicente Pastor y a mi cotutor Carlos Micó, por brindarme la oportunidad de realizar el TFG con ellos, así como toda la ayuda y orientación que me han ofrecido. También agradecer a Leo y a Alba por toda la ayuda recibida y el buen trato desde el primer día que entré.

Agradecer a la Universitat Politècnica de València toda la formación recibida y los recursos, tanto humanos como materiales, que ha puesto a mi disposición durante estos cuatro años.

Por último, agradecer a mi familia y a mis amigos por la paciencia que han tenido conmigo y todo el cariño y apoyo incondicional que me han dado.

Muchas a gracias a todos los que habéis aportado vuestro granito de arena.

Resumen

El presente trabajo plantea la aplicación de un sistema de generación de plasma mediante un láser pulsado, para reemplazar a la bujía convencional en motores de combustión interna alternativos. Este sistema permite cambiar, además del instante de encendido, su posición espacial de forma simple. Esto permitiría adaptar la posición de encendido a zonas de la cámara de combustión más favorables, dependiendo de las condiciones de funcionamiento del motor. Se espera que esto pueda influir notablemente en las prestaciones y la eficiencia del motor.

Este sistema de encendido se va a poner en práctica en una instalación de alta presión y alta temperatura, capaz de alcanzar condiciones termodinámicas semejantes a las que se dan en la cámara de combustión de un motor de encendido por compresión. En estas condiciones, se van a evaluar tanto la influencia de la posición del plasma como el instante en el que se genera sobre el desarrollo de la combustión y la formación de hollín. Además, se ha decidido emplear gasolina y diésel convencionales, así como mezclas de estos para estudiar también la interacción de combustibles con distintas propiedades con el sistema de encendido.

La instalación en la que se va a realizar el trabajo consta de accesos ópticos, que permiten visualizar todos los fenómenos que ocurren en su interior. Por ese motivo, el estudio de la combustión y formación de hollín se va a realizar principalmente mediante la aplicación de técnicas ópticas. Estas, se basan en el análisis de la radiación emitida por la combustión y la interacción de esta con las distintas especies que se forman.

Abstract

The present work proposes the application of a plasma generation system by means of a pulsed laser, to replace the conventional spark plug used in reciprocating internal combustion engines. The system allows modifying easily not only the ignition timing but also its position. It allows to adapt the ignition position to more adequate combustion chamber areas, depending on the engine operation conditions. It is expected that this will remarkably influence engine performance and efficiency.

The ignition system is going to be applied to a high-pressure and high-temperature vessel, being able to reach thermodynamic conditions similar to those found at the combustion chamber of a compression ignition engine. Under these conditions, the influence of position and timing of the plasma are over combustion development and soot formation is going to be evaluated. Furthermore, it has been decided to use conventional gasoline and diesel fuels as well as different mixtures of them. The purpose is studying also the interaction between different fuel properties and the ignition system.

The facility has optical accesses, which allow visualizing all phenomena that takes place inside. For this reason, the combustion and soot formation study are going to be performed mainly through the application of optical techniques. These are based on the analysis of radiation emitted by combustion and its interaction with the different species formed.

Resum

El treball present planteja l'aplicació d'un sistema de generació de plasma mitjançant un pols làser, per reemplaçar la bugia convencional en motors de combustió interna alternatius. Aquest sistema permet canviar, a més de l'instant de l'encès, la seua posició espacial de forma simple. Açò permet adaptar la posició de l'encès a zones de la càmera de combustió mes favorables, depenent de les condicions de funcionament del motor. Se espera que açò pogués influir notablement en les prestacions i la eficiència del motor.

Aquest sistema de encès es va a posar en pràctica en una instal·lació d'alta pressió i alta temperatura, capaç d'alcançar condicions termodinàmiques semblants a les que es donen en la càmera de combustió d'un motor d'encès per compressió. En aquestes condicions, es va a avaluar tant l'influència de la posició del plasma com l'instant en el que es genera en el desenvolupament de la combustió i la formació de sutja. A més, s'ha decidit utilitzar gasolina i dièsel convencionals, així com mescles d'aquests per estudiar també la interacció de combustibles amb diferents propietats amb el sistema d'encès.

La instal·lació en la que es va a realitzar el treball consta d'accessos òptics, que permeten visualitzar tots els fenòmens que es donen al seu interior. Per aquest motiu, l'estudi de la combustió i formació de sutja es va a realitzar principalment mitjançant l'aplicació de tècniques òptiques. Aquestes tècniques es basen en l'anàlisi de la radiació emesa per la combustió i la interacció de aquesta amb les diferents espècies que es formen.

Tabla de Contenidos

Documento I

1	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Antecedentes	1
1.3	Objetivo del trabajo	4
1.4	Estructura del trabajo	4
2	Fundamentos Teóricos	5
2.1	Introducción	5
2.2	Combustión por difusión	5
2.2.1	Formación de mezcla	6
2.2.2	Combustión	7
2.2.3	Longitud de despegue de llama	8
2.2.4	Formación de hollín	9
2.3	Sistema de encendido por plasma	10
3	Metodología Experimental	13
3.1	Introducción	13
3.2	Instalación Experimental	13
3.2.1	Motor-Maqueta	13
3.2.2	Sistema de inducción láser de plasma	15
3.3	Herramientas de Medición	16
3.3.1	Técnicas de visualización y medida	16
3.3.2	Análisis de señal de presión	20
3.3.3	Modelo unidimensional del chorro	21
3.4	Condiciones de operación	23
4	Aplicación del sistema de encendido por plasma para el fasado espacial y temporal del proceso de combustión.	25
4.1	Introducción	25
4.2	Evaluación del proceso de auto-encendido	26
4.3	Comportamiento del sistema de encendido por plasma	31
5	Características de la combustión asistida por plasma	41
5.1	Introducción	41
5.2	Formación de Hollín	41
5.3	Desarrollo de la combustión	48
5.4	Resumen	52
6	Conclusiones	53
6.1	Conclusiones	53
6.2	Trabajos futuros	54

Bibliografía	55
Documento II	1
1 Presupuesto	3
1.1 Equipo humano	3
1.2 Instrumental específica	3
1.3 Consumibles	5
1.4 Presupuesto final	5

Índice de Figuras

1.1	Evolución de la restricción de NOx e Hidrocarburos en la normativa EURO.	2
1.2	Evolución de la restricción de partículas en la normativa EURO.	3
2.1	Esquema de combustión por difusión. Adaptado de [2].	6
2.2	Procesos que intervienen en la formación de hollín.	9
3.1	Esquema del montaje de la culata y el cilindro.	14
3.2	Láser Nd: YAG (<i>Modelo Continuum Surelite II</i>).	15
3.3	Lente y espejos empleados para posicionar el haz del láser.	16
3.4	Disposición del montaje del motor maqueta.	16
3.5	Imagen post-procesada de la localización del LOL.	17
3.6	Instantánea extraída de la secuencia de video de la técnica NL.	18
3.7	Imágenes tomadas con la técnica LEI. A) con LED; B) sin LED; C) absorción resultante (imagen post-procesada).	20
3.8	Ajuste con la curva de penetración del chorro experimental para la elección del ángulo del cono.	22
4.1	Secuencia de imágenes de luminosidad natural (NL) del proceso de combustión de B0, 5050 y 7030 a ρ =[densidad] y T=[temperatura] y P_{inj} =1000 bar.	27
4.2	Relación del ID de cada combustible con el de referencia (B0).	28
4.3	Comparación entre la presión en la cámara de combustión de un ciclo de combustión y su correspondiente arrastre, para B0 (izquierda) y 7030 (derecha) y P_{inj} = 1000 bar.	29
4.4	RoHR (izquierda) y HR (derecha) en función del ángulo de giro del cigüeñal, para los combustibles B0 y 7030 y P_{inj} = 1000 bar.	30
4.5	Penetración del chorro en condiciones inertes para el combustible 7030 y 5050, en condiciones termodinámicas de media temperatura (MT).	33
4.6	Variación de la fracción másica del combustible en el tiempo, para las diferentes posiciones a las que se ha disparado el plasma. Condiciones termodinámicas de media temperatura (MT) para el combustible 7030.	34
4.7	Efecto del retraso (derecha) y la posición (izquierda) del plasma sobre el ID, para el combustible 7030, en MT y una presión de inyección de 1000 y 1500 bar.	36
4.8	Efecto del retraso (derecha) y la posición (izquierda) del plasma sobre el LOL, para el combustible 7030, en MT y una presión de inyección de 1000 y 1500 bar.	37
4.9	Efecto de la variación del retraso de plasma sobre ID para LT (izquierda). Efecto de variación de la posición de plasma sobre LOL para NO (derecha). Ambas gráficas para las presiones de inyección de 1000 y 1500 bar para el combustible 7030.	38

5.1	Secuencia de luminosidad natural correspondiente a los tres combustibles, $P_{inj} = 1000$ bar y condiciones de funcionamiento del motor de media temperatura(MT).	42
5.2	Mapa de intensidad lumínica para los tres combustibles. Condiciones de funcionamiento del motor LT, MT y NO, $P_{inj} = 1000$ bar.	43
5.3	Mapa de intensidad lumínica para los tres combustibles. Condiciones de funcionamiento del motor LT, MT y NO, $P_{inj} = 1500$ bar.	44
5.4	Secuencia de luminosidad por extinción de luz correspondiente a los tres combustibles, $P_{inj} = 1000$ bar y condiciones de funcionamiento del motor de media temperatura(MT). Las imágenes son el resultado de promediar las 30 repeticiones.	46
5.5	Mapas concentración de hollín, (factor KL) Condiciones de funcionamiento del motor LT, MT y NO, $P_{inj} = 1000$ bar.	47
5.6	Mapas concentración de hollín, (factor KL) Condiciones de funcionamiento del motor LT, MT y NO, $P_{inj} = 1500$ bar.	47
5.7	Curvas de presión en el cilindro con una presión de inyección de 1000 bar.	49
5.8	Curvas de presión en el cilindro con una presión de inyección de 1500 bar.	49
5.9	Curvas de liberación de calor y ratio de liberación de calor con una presión de inyección de 1000 bar y condiciones termodinámicas LT y NO.	50
5.10	Curvas de liberación de calor y ratio de liberación de calor con una presión de inyección de 1500 bar y condiciones termodinámicas LT y NO.	51

Índice de Tablas

3.1	Condiciones de funcionamiento del motor.	23
3.2	Mezclas empleadas en el estudio.	23
3.3	Propiedades de los combustibles primarios que forman las mezclas.	23
3.4	Posición del pulso láser respecto al inyector en su eje longitudinal.	24
3.5	Puntos de funcionamiento del sistema de encendido por plasma utilizados en los ensayos.	24
4.1	Tabla de efectividad del encendido por compresión para los diferentes combustibles.	26
4.2	Tabla de efectividad del encendido por plasma para combustible 7030, en los diferentes retrasos. Condición MT, $P_{inj}= 1000$ y 1500 bar.	31
4.3	Tabla de efectividad del encendido por plasma para combustible 7030, en las diferentes posiciones. Condición MT, $P_{inj}= 1000$ y 1500 bar.	32
4.4	Tabla de efectividad del encendido por plasma para combustible 5050, en los diferentes retrasos. Condición MT, $P_{inj}= 1000$ y 1500 bar.	32
4.5	Tabla de efectividad del encendido por plasma para combustible 5050, en las diferentes posiciones. Condición MT, $P_{inj}= 1000$ y 1500 bar.	32
4.6	Tabla de los puntos de funcionamiento semejantes al combustible B0 (Auto-encendido), para las diferentes condiciones termodinámicas de funcionamiento del motor (LT, MT, NO) con una presión de inyección de 1000 bar para los combustibles 5050 y 7030.	39
4.7	Tabla de correspondencias de los combustibles estudiados en sus puntos de funcionamiento semejantes al combustible B0 (Auto-encendido), para las diferentes condiciones termodinámicas de funcionamiento del motor (LT, MT, NO) con una presión de inyección de 1000 bar.	40
1.1	Costes asociados al equipo humano que ha intervenido en el proyecto.	3
1.2	Amortización anual del equipamiento	4
1.3	Gastos anuales del equipamiento	5
1.4	Resumen de costes asociados con el material consumible.	5
1.5	Presupuesto total anual	6

Nomenclatura

<i>TFG</i>	-	Trabajo de Fin de Grado
<i>MCIA</i>	-	Motor de Combustión Interna Alternativo
<i>ID</i>	-	Retraso de Encendido (Ignition Delay)
<i>LOL</i>	-	Longitud de Despegue de Llama (Lift-Off Length)
<i>HR</i>	-	Liberación de Calor (Heat Release)
<i>RoHR</i>	-	Tasa de Liberación de Calor (Rate of Heat Release)
<i>DI</i>	-	Inyección Directa (Direct Injection)
<i>IDI</i>	-	Inyección Indirecta (Indirect Injection)
<i>aSOE</i>	-	Señal de actuación del inyector (after Start of Energizing)
<i>LED</i>	-	Diodo emisor de luz (Light-Emitting Diode)
<i>CMT</i>	-	Centro de Motores Térmicos
<i>LT</i>	-	Baja Temperatura (Low Temperature)
<i>MT</i>	-	Media Temperatura (Medium Temperature)
<i>NO</i>	-	Nominal
<i>CO₂</i>	-	Dióxido de Carbono
<i>MEC</i>	-	Motor de Encendido por Compresión
<i>MEP</i>	-	Motor de Encendido Provocado
<i>NO_x</i>	-	Óxidos de Nitrogeno
<i>PM</i>	-	Partículas Sólidas
<i>PAH</i>	-	Hidrocarburos Poliaromáticos
<i>LEI</i>	-	Extinción de Luz
<i>NL</i>	-	Luminosidad Natural
<i>DICOM</i>	-	Modelo de chorro unidimensional

Documento I

Memoria

Capítulo 1

Introducción

1.1 Motivación

La realización de un Trabajo de Fin de Grado tiene como finalidad encontrar una solución a un problema concreto. Con esa intención se ha realizado este proyecto para el CMT - Motores Térmicos de la Universitat Politècnica de València, cuyo objetivo es el estudio del comportamiento de la combustión y la viabilidad del encendido por plasma haciendo uso de diferentes combustibles en un motor maqueta, que replica unas condiciones de funcionamiento semejantes a las de un motor diésel comercial.

Este trabajo de fin de grado también tiene carácter académico, debido a que la documentación presente conforma el Trabajo de Fin de Grado del alumno, el cual es requerido para obtener la titulación de Ingeniero Mecánico por parte de la Universitat Politècnica de València, así como para la aplicación de conocimientos teóricos adquiridos previamente en otras disciplinas.

Otra motivación del trabajo presente es la de ampliar los conocimientos referentes a la combustión, así como para ampliar la investigación interna del departamento de técnicas ópticas.

1.2 Antecedentes

El tipo de propulsión ampliamente usado durante el último siglo para vehículos terrestres ligeros así como pesados es el de los motores de combustión interna alternativos, también llamados por las siglas MCIA. Estos motores pueden ser clasificados de dos tipos distintos dependiendo de la forma en la que se inicia la combustión en su interior. El tipo más usado hoy en día debido a su rendimiento y en el que se basa este trabajo es el motor de encendido por compresión (MEC), también llamado motor diésel. El otro tipo sería el de combustión por encendido provocado (MEP), también conocido comúnmente como motor de gasolina.

Bien es sabido que desde 1992, cuando apareció la primera normativa EURO que regula los niveles de contaminación en los vehículos, el sector de la automoción dio un giro de ciento-ochenta grados en dirección a un futuro con motores más respetuosos con el medioambiente. No obstante, con la creciente concienciación de la sociedad sobre el cuidado del medioambiente, fomentado por fenómenos como el calentamiento global debido a las emisiones de CO_2 , se ha acelerado el endurecimiento de esta normativa en los últimos años. Sólo teniendo en cuenta el transporte por carretera, las emisiones asociadas

al uso de MCI A suponen el 15% de los gases de efecto invernadero emitidos en todo el mundo. A este endurecimiento también contribuye el efecto que ciertos productos de la combustión pueden tener directamente sobre la salud de las personas. Entre ellos, destacan los óxidos de nitrógeno (NO_x) y las partículas sólidas (PM). En las figuras [1.1] y [1.2] se muestra la evolución de la normativa europea a este respecto. En la actualidad, los límites se han reducido por debajo de un 10% de los propuestos en 1992, y la tendencia va a seguir con la próxima EURO 7 y las nuevas normativas que la reemplacen. Por tanto, está siendo una ardua tarea para los fabricantes hoy en día cumplir dicha normativa con la tecnología existente [1].

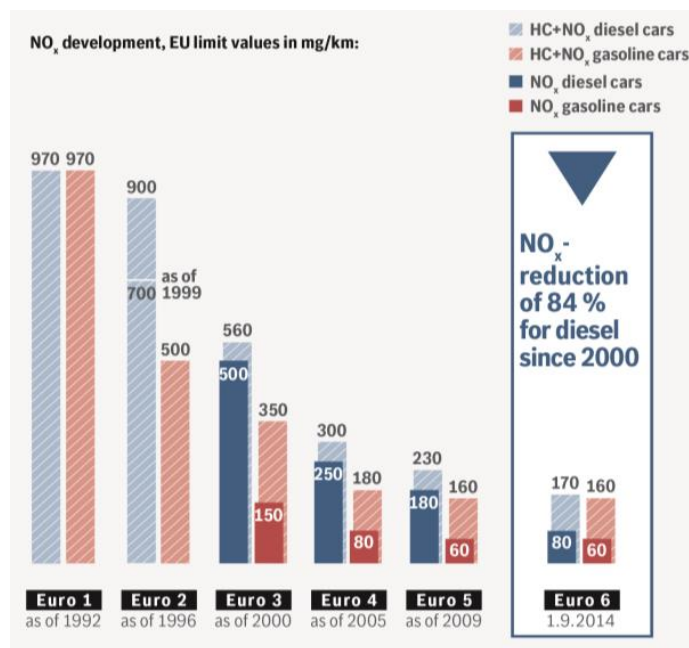


Figura 1.1: Evolución de la restricción de NO_x e Hidrocarburos en la normativa EURO.

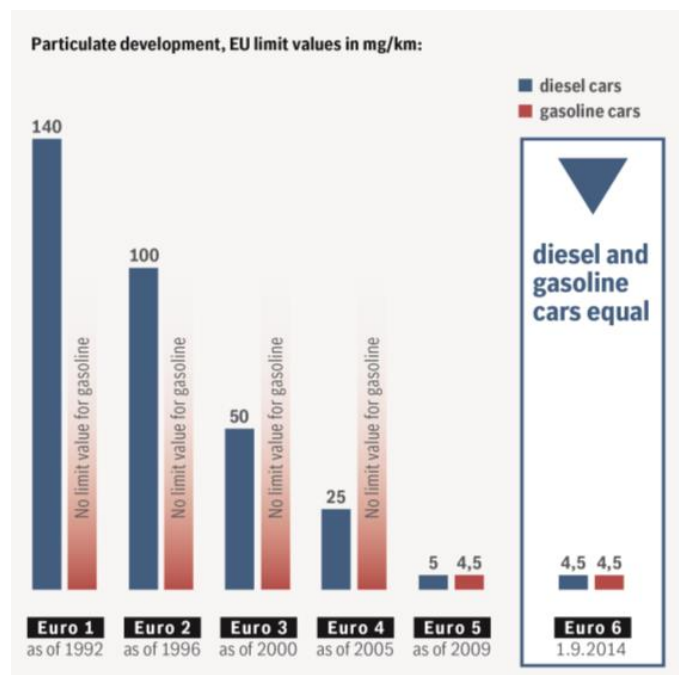


Figura 1.2: Evolución de la restricción de partículas en la normativa EURO.

De este modo, en los últimos años han comenzado a llegar al mercado diferentes soluciones, que se basan en importantes cambios en los MCIAs, tal como se conocían hasta ahora. Una de ellas fue la hibridación, tanto para motores diésel como para gasolina. Esta se basa en combinar el MCIÁ con motor eléctrico, en diferentes formas, para mejorar la eficiencia del sistema de propulsión. Aunque en la actualidad cada vez se está extendiendo más, su elevado coste hizo que no fuese una opción muy demandada en sus inicios para el consumidor medio. Otra solución, mas enfocada a los vehículos con motor MEP, fue el llamado "Downsizing". Éste conseguía reducir emisiones mediante la disminución del tamaño del motor, que conseguía ser más eficiente.

Además de lo ya mencionado, los fabricantes en colaboración con distintos centros de investigación a lo largo del mundo están trabajando en el desarrollo de nuevos conceptos. Una de las corrientes más extendida es el desarrollo de alternativas al tradicional MEC y MEP. Se trata de nuevos modos de combustión como en encendido por compresión de carga homogénea o el encendido por compresión con reactividad controlada. Estos nuevos conceptos ya han demostrado un enorme potencial a la hora de mejorar la eficiencia del motor y reducir emisiones, pero su aplicación todavía presenta problemas tecnológicos que hay que resolver.

Por otro lado, existe otra corriente de trabajo que se centra en la investigación de nuevos combustibles, que puedan mejorar el funcionamiento de los MCIÁ. En este sentido se pueden encontrar numerosos trabajos con biocombustibles o combustibles sintéticos (E-fuels). Otra alternativa en la que se está trabajando es en la combinación de combustibles comerciales que, al mezclarse, den como resultado unas propiedades que mejoren las prestaciones del MCIÁ. Una aplicación concreta es la mezcla de diésel (más reactivo) con gasolina (menos reactivo). Esto permite, por ejemplo, a motores MEC trabajar en condiciones que reducen las emisiones contaminantes y que no serían posibles si se empleara diésel puro. La principal ventaja de este método es que la tecnología necesaria para

su implementación está disponible pero, por el contrario, su aplicación no se ha conseguido extender a todo el rango de funcionamiento de un motor convencional. El hecho de utilizar un combustible poco reactivo, que tiene que encenderse sin ayuda externa, dificulta que la combustión tenga lugar.

Teniendo en cuenta lo anterior, diversos grupos de investigación están trabajando con la idea de combinar mezclas de diésel y gasolina con sistemas de encendido (como una bujía, por ejemplo) para ayudar a la combustión cuando sea necesario. En este marco, el I.U.I. CMT-Motores ha trabajado durante los últimos años en un sistema de encendido por plasma que se ha demostrado capaz de encender combustible diésel bajo determinadas condiciones, pero que su uso no ha sido extendido todavía a otros ámbitos.

1.3 Objetivo del trabajo

Teniendo en cuenta todo lo anterior, dado el potencial que ofrece la combinación de diésel y gasolina en motores MEC y la necesidad de solventar los problemas que presenta este concepto actualmente, los objetivos que se plantean en este TFG son:

- Determinar la viabilidad de un sistema de encendido por plasma para asistir la combustión de diferentes mezclas de diésel y gasolina poco reactivas, en un motor de encendido por compresión y para diferentes condiciones de operación.
- Estudiar el comportamiento de la combustión de dichas mezclas y la formación de contaminantes, cuando se utiliza el sistema de encendido asistido por plasma.

1.4 Estructura del trabajo

En esta sección se procede a describir la estructura de los documentos que conforman el TFG, para así poder facilitar su lectura.

El primer documento es la Memoria. En el primer capítulo de ésta, se presenta una introducción al problema que se aborda. En dicha introducción se comentarán los motivos de la realización del trabajo, los antecedentes históricos sobre la materia que se analiza, los objetivos de dicho trabajo, así como la viabilidad del proyecto realizado y las estructura de la documentación en su realización.

Acto seguido se incluye el capítulo [2], donde se explican los fundamentos teóricos de la combustión por difusión, que es la que tiene lugar en un MEC. Se ha considerado necesario, para poder entender correctamente los resultados y el análisis que se presenta en capítulos posteriores. A continuación, en el capítulo [3], se describe la metodología experimental. Esto incluye la instalación, las herramientas y las condiciones de contorno que definen los experimentos.

En los siguientes capítulos, se muestran los resultados obtenidos y su análisis. Por último, se presentan las conclusiones más importantes en el capítulo [6].

A la memoria le acompaña un documento adicional que detalla el presupuesto requerido para el trabajo realizado.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

2.1 Introducción

En el siguiente capítulo se pretende exponer, de forma breve, los conceptos teóricos relacionados con la combustión por difusión, que es característica de los motores diésel. Esto incluye tanto los procesos físicos de evaporación y mezcla del combustible como los químicos, por los que éste se transforma en energía y en productos de combustión, como es el hollín.

En un motor diésel o de encendido por compresión, el combustible es introducido en la cámara de combustión a elevada presión. En ésta, la densidad y la temperatura del aire son elevadas, lo que favorece los procesos de atomización, mezcla y evaporación. Cuando se alcanzan las condiciones adecuadas en un punto del chorro de combustible, se inician las reacciones químicas que desembocan en un proceso de combustión en el que dominan los procesos de difusión entre el aire y los elementos sin quemar. Es en ese momento, que puede extenderse más allá del final de la inyección de combustible, cuando la energía se libera.

El principal objetivo de este capítulo es aportar la información necesaria sobre la combustión por difusión y los fenómenos que la dominan, para poder comprender el trabajo realizado y los resultados que se presentan en capítulos posteriores.

2.2 Combustión por difusión

La Figura [2.1] muestra el esquema de una combustión por difusión. Esta, corresponde a un modelo presentado por J.Dec [2], el cual describe en detalle los distintos procesos físicos y químicos que se dan en una combustión de este tipo. Este modelo fue publicado en 1999 y, desde entonces, ha variado muy poco.

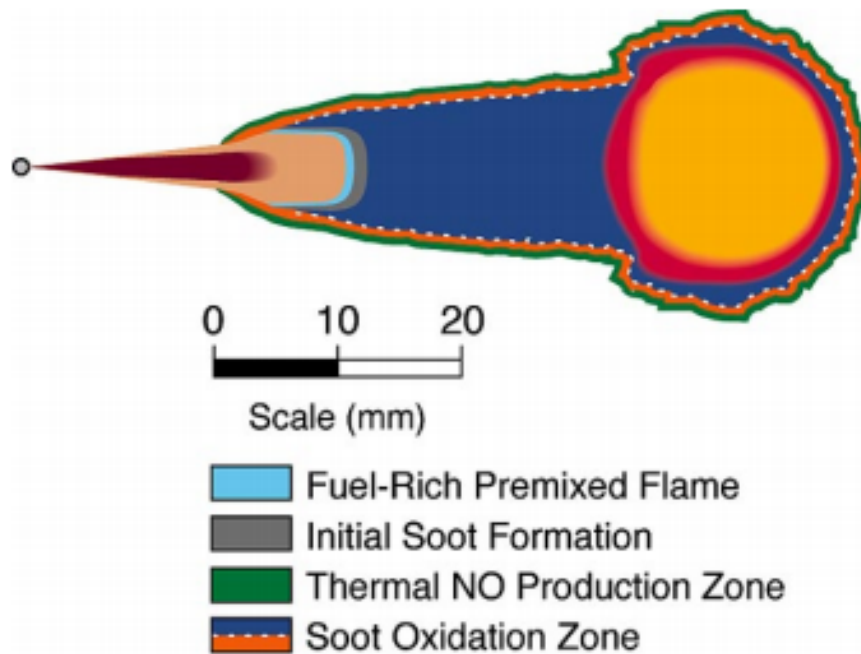


Figura 2.1: Esquema de combustión por difusión. Adaptado de [2].

Este modelo, además de ser capaz de describir la secuencia temporal que sigue el combustible desde que se inyecta hasta que se oxida completamente, también identifica las regiones de la llama de difusión en la que tienen lugar los distintos fenómenos. En este sentido, se pueden identificar dos zonas principales: zona inerte, donde tiene lugar la formación de la mezcla aire/combustible; zona reactiva, donde tienen lugar la combustión. La frontera que separa una zona de la otra es la superficie de oxidación de hollín que se muestra en la Figura [2.1]. (naranja). En esta, la proporción aire/combustible es cercana a la estequiometría y es donde tienen lugar las reacciones químicas.

También es importante destacar que este modelo representa una región, dentro de la zona reactiva y envuelta por la superficie de oxidación, que es donde tiene lugar los procesos de formación de hollín que se verán más adelante. A partir de ciertas especies que aparecen cuando el combustible se oxida, las partículas de hollín se generan y van creciendo en ausencia de oxígeno. Esto ocurre en la zona representada en azul oscuro.

2.2.1 Formación de mezcla

En un sistema de inyección como el empleado en este proyecto, la geometría de los orificios del inyector determinan las propiedades del fluido y su comportamiento tanto en el interior como en el exterior de la tobera.

Uno de los fenómenos que toma relevancia es la cavitación. Éste se da cuando la presión estática en el seno del fluido disminuye hasta alcanzar un valor inferior al de la presión de vapor. Esto genera la aparición de burbujas de gas que se transmiten hasta la salida del conducto y que condicionan en gran medida el comportamiento del flujo a la salida del orificio del inyector.

La aparición de este fenómeno puede favorecer la atomización. Éste es el primer fenómeno que se da cuando se forma el chorro en la salida del orificio, y se trata de la división del núcleo líquido principal en pequeña gotas. Este fenómeno da lugar a una mejor mezcla entre el combustible y el aire, debido a que la superficie de contacto entre estos se ve aumentada. Cuanto menor tamaño tenga la gota, más se favorecerá la mezcla.

La interacción entre el aire y el combustible permite pasar de la atomización a la fase de evaporación. Las pequeñas gotas entran en contacto con el aire caliente, dando lugar a un intercambio de calor que provoca un aumento de la temperatura de la gota. Una vez ésta ha alcanzado la temperatura de cambio de fase, se transforma en vapor.

En los primeros momentos de la inyección, la parte líquida del chorro coincide con el frente del chorro. Transcurridos unos instantes, esta fase líquida se estanca y el frente, compuesto ahora por combustible evaporado, se separa. A partir de este momento la fase líquida alcanza lo que se conoce como longitud líquida máxima.

2.2.2 Combustión

A medida que se van produciendo los fenómenos anteriormente descritos, la mezcla dentro de la cámara de combustión alcanza una temperatura elevada en un ambiente rico en oxígeno, que si se le suma el estado de inestabilidad química, se da lugar a una reacción exotérmica en la que se libera toda la energía que contenía el combustible. A este proceso se le llama combustión. Éste, se puede dividir en las siguientes fases:

Retraso de encendido

La fase de retraso de encendido comienza desde que se empieza a inyectar combustible, hasta que se inician las reacciones químicas que dan lugar a la combustión. En este sentido, se pueden identificar dos etapas. En la primera se dan reacciones poco exotérmicas debido a la baja temperatura, que normalmente es inferior a 750 K. Sin embargo, esta pequeña cantidad de energía termina desembocando en la segunda fase. En ésta, las reacciones pasan a ser predominantemente exotérmicas, que da lugar y marcan el autoencendido del chorro. El combustible empleado es un factor que condicionará en gran medida esta fase de retraso, siendo la propiedad clave el índice de cetano.

Teniendo esto en cuenta, el parámetro conocido como retraso de encendido (ID), es el intervalo de tiempo medido desde que se comienza a inyectar el combustible hasta que aparecen las primeras reacciones de alta temperatura descritas anteriormente. Un mayor retraso de encendido se traduce en más tiempo para que la mezcla aire/combustible se homogeneice, dando lugar a una oxidación más completa.

Combustión premezclada

En esta fase reacciona todo el combustible evaporado y mezclado con el aire en la fase de retraso de encendido [3]. La reacción es de carácter exotérmico y ocurre de forma muy rápida puesto que, como su nombre indica, se produce en condiciones de premezcla aire/combustible. Esto da lugar a un incremento de la tasa de calor liberado hasta alcanzar un máximo para, posteriormente, disminuir hasta un mínimo local cuando toda esa

mezcla se ha consumido. Esto da lugar a un pico característico al principio de la curva de la tasa de liberación de calor. Durante esta fase se pueden formar las especies que se consideran precursoras del hollín (acetileno e hidrocarburos poliaromáticos), debido a que no se alcanza una oxidación completa del combustible. Cuanto mayor cantidad de aire se haya mezclado con el combustible antes de reaccionar, el proceso de oxidación será más completo.

Combustión por difusión

Esta es la última fase de la combustión y se caracteriza porque comienza cuando ya se ha oxidado todo el combustible premezclado proveniente de la fase de retraso de encendido. Cuando se haya consumido todo el combustible inyectado será cuando esta fase se dé por finalizada. Durante la misma, se dan fenómenos de formación de mezcla y combustión de forma simultánea [3].

Se determina principalmente la formación de la mezcla aire-combustible. La tasa de liberación de calor en esta fase es controlado principalmente por la tasa de formación de la mezcla aire-combustible. Esta, a su vez, está dominada por el momento cinético que es aportado al combustible durante la inyección. Mientras el combustible se encuentra en la zona inerte, éste se va atomizando, mezclando con aire y evaporando hasta que alcanza la zona reactiva donde se oxida. Al igual que en la fase anterior, la cantidad de oxígeno que se mezcle con el combustible antes de reaccionar, determinará en qué medida se oxida el combustible y si se forman precursores de hollín.

Si el tiempo de inyección es prolongado lo suficiente, la llama es capaz de alcanzar condiciones estacionarias y presentar una estructura como la que se muestra en la Figura [2.1]. Desde el instante que se deja de inyectar en la cámara de combustión y se detiene la generación de momento cinético con esta, la formación de mezcla aire-combustible es comandada principalmente por el flujo de aire remanente dentro de la cámara y de la conservación de energía cinética en el chorro. A partir de aquí se irá quemando lentamente la mezcla restante, reflejando en la curva de la tasa de liberación de calor una disminución progresiva. La combustión irá perdiendo intensidad hasta que la llama se extinga por completo.

2.2.3 Longitud de despegue de llama

La longitud de despegue de llama (LOL) [3], se define como la distancia entre el inyector y el inicio de la zona de reacción. Haciendo referencia a la Figura [2.1], esta sería la distancia entre el inyector y el inicio de la línea de oxidación (naranja).

Como menciona C. Micó [4], este parámetro es importante en la combustión diésel, dado que está relacionado con la formación de hollín. Durante la fase de combustión por difusión, cuanto mayor sea esta distancia más cantidad de oxígeno puede englobar el combustible antes de reaccionar. En la zona donde tiene lugar la oxidación aparece el radical OH, por lo que su detección ayuda a definir esta frontera y la distancia a la que se encuentra con respecto al inyector.

Este parámetro, como se verá en el capítulo [5], está relacionado con el retraso del encendido, como bien explica C. Micó [4]. Se puede interpretar que, para un tiempo de retraso mayor, el combustible tardará más en reaccionar y se alejará más del inyector, dando lugar a una distancia de despegue de llama mayor. Esto aumenta la cantidad de oxígeno englobado antes de la zona donde se tienen las reacciones de alta temperatura lo que permite una mayor oxidación del combustible y una menor formación de precursores de hollín.

2.2.4 Formación de hollín

El conocimiento acerca de la formación de hollín se ha visto incrementado conforme han ido evolucionando las técnicas de diagnóstico óptico. Se han propuesto varias teorías a lo largo del tiempo, pero hay una que probablemente sea la que mejor se ajuste a lo observado en un sistema de combustión por difusión. Dicha teoría es la que se muestra a continuación en la figura [2.2].

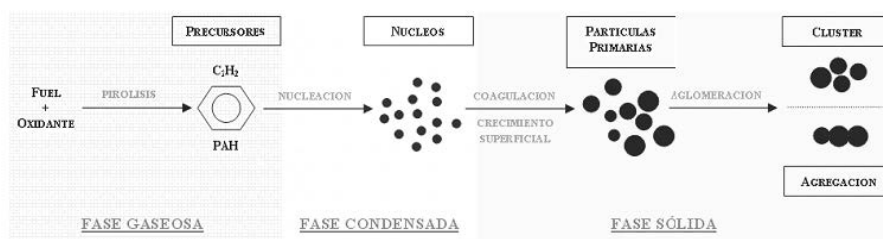


Figura 2.2: Procesos que intervienen en la formación de hollín.

C. Monin [5] explica con detalle los procesos que intervienen en la formación de hollín, los cuales son:

Pirólisis

La pirólisis es un proceso en el que durante su desarrollo la estructura molecular del combustible es alterada en presencia de altas temperaturas. Teniendo como resultado la aparición de acetileno C_2H_2 y de moléculas de hidrocarburos poliaromáticos (PAH). Estos PAH son moléculas compuestas por una multitud de moléculas de benceno C_6H_6 , también conocidos por el nombre de "anillos". Estas especies son consideradas como las precursoras directas para la formación de hollín.

Nucleación

La nucleación es un proceso homogéneo que tiene lugar en la fase gaseosa y da lugar a la formación de las primeras partículas de hollín a partir de los precursores.

Los núcleos de hollín se forman entre una temperatura de 1300 y 1600 K. Espacialmente estos se forman en una región restringida cerca de donde transcurren las primeras reacciones, en la zona de pirólisis donde la temperatura y la concentración de radicales es más alta. Los núcleos de hollín formados se componen de partículas carbonosas que se estructuran en redes cristalinas que contienen alrededor del 1% en peso de hidrógeno.

Durante el proceso, se ha formado un gran número de núcleos, aunque tienen tamaños muy pequeños y no tienen relevancia en la masa total de hollín final, sino que tienen una influencia en la masa que se añade después, proporcionando sitio para el crecimiento superficial.

Crecimiento y coagulación

Esta fase se caracteriza por un aumento del tamaño de las partículas. Este aumento puede darse por un proceso de crecimiento superficial es aquel, en el que se añade masa en la superficie de los núcleos de hollín. De forma simultánea, también tiene lugar la coagulación o agregación de partículas. El primer proceso supone un aumento de la masa de las partículas sin variar su número.

Sin embargo, en la coagulación las partículas jóvenes y de pequeño tamaño colisionan y se funden formando otra partícula más grande. Esto aumenta la masa pero también reduce el número total de partículas.

La mayoría de la masa del hollín se consigue en esta fase. Adicionalmente, la tasa de crecimiento disminuye a partir del momento de la formación del núcleo de hollín, debido a la pérdida de reactividad de las partículas. Esto hace que las partículas recién formadas crezcan más rápido.

Aglomeración

Finalizado el proceso de crecimiento y de coagulación, se da lugar a la fase de aglomeración, en la que las partículas colisionan para formar aglomerados. Estas partículas de hollín al colisionar no se funden, sino que dan lugar conjuntos en forma ramificada.

Se pueden diferenciar dos tipos de aglomeración:

- Formación de racimos o clúster: esferas sólidas de pequeño tamaño colisionan y se pueden unir por fuerzas de cohesión débiles, dando lugar a la formación aglomerados con forma de racimo (clúster).
- Agregación: unión producida por un número reducido de partículas con distribución asimétrica mediante fuerzas cohesivas atómicas o moleculares.

El proceso de aglomerados-clúster va perdiendo importancia frente al de agregación a medida que la temperatura de los gases disminuye.

2.3 Sistema de encendido por plasma

Los sistemas de encendido son muy comunes en motores de encendido provocado. En éstos, las condiciones de operación y las características del combustible son tales que no produce un autoencendido y se requiere de un aporte de energía adicional para iniciar la combustión. Normalmente, disponen de un elemento “energizante” capaz de suministrar la energía necesaria en un punto, dentro de la cámara de combustión, para desencadenar

una reacción que acabe oxidando toda la mezcla aire/combustible que hay dentro de ella.

El instante en el que se libera esta energía es importante a la hora de conseguir una buena sincronización de la combustión, y esto es fácil de conseguir con el sistema electrónico de control adecuado. Sin embargo, estas bujías van alojadas dentro de la culata del motor, por lo que su posición dentro de la cámara de combustión es invariable.

Recientemente, estos sistemas de encendido han comenzado a cobrar interés también para motores de encendido por compresión. Teniendo en cuenta las últimas tendencias en investigación, los nuevos modos de combustión que se están desarrollando o el uso de combustibles alternativos con distinta reactividad necesitan un sistema de encendido que permita extender su rango de aplicación y eficiencia a todas las condiciones de operación exigidas en un motor comercial. Se pueden encontrar en la literatura ejemplos de aplicación de sistemas de encendido tradicionales, como el “Spark Assisted Compression Ignition” [6].

Los sistemas más comunes son aquellos basados en bujías, que generan un arco eléctrico cuando sus electrodos son sometidos a un potencial suficientemente elevado (en torno a 5000 V). Sin embargo, en la actualidad existen alternativas que, si bien no se han llegado a implementar todavía en soluciones comerciales, muestran un gran potencial. Una de ellas es el sistema de encendido por inducción de plasma mediante láser.

Este sistema utiliza la radiación de un láser de alta energía, enfocada en un volumen pequeño de la cámara de combustión, para que el campo electromagnético asociado a dicha radiación genere un flujo de electrones entre moléculas del gas que se encuentra alrededor. En el caso de un motor, esto se produce cuando la radiación del láser consigue ionizar las moléculas de la mezcla aire/combustible que se encuentra en el volumen excitado, generando una descarga de plasma que puede alcanzar del orden de 10^6 K de temperatura.

Para poder obtener la energía necesaria, normalmente se recurre a láseres pulsados, con una duración de pulso del orden de 10 ns. Por ello, el proceso de encendido tiene una duración muy pequeña en comparación con el resto de reacciones químicas de la combustión. Sin embargo, genera tal cantidad de energía que hace que las condiciones termodinámicas que se den en el volumen excitado sean favorables para provocar el encendido tanto de mezclas gaseosas como hasta de chorros líquidos de combustible.

Capítulo 3

Metodología Experimental

3.1 Introducción

El siguiente capítulo consta de tres partes. En la primera se habla de la instalación que se ha empleado para la realización de los ensayos, donde se describe el motor, el sistema de inyección y el sistema láser utilizado para el encendido por plasma. En la segunda parte de este capítulo, se habla de las herramientas de medición empleadas. En la tercera parte se habla de las condiciones de operación del motor empleadas en este estudio.

3.2 Instalación Experimental

3.2.1 Motor-Maqueta

La instalación experimental utilizada para realizar los ensayos se basa en un motor de dos tiempos y un único cilindro con accesos ópticos, en el cual es posible alcanzar un amplio rango de condiciones termodinámicas similares a las que se pueden encontrar en un motor diésel. Esta instalación se conoce como Motor-Maqueta.

El motor empleado está basado en un Jenbach JW 50, el cual cuenta con una cilindrada de tres mil centímetros cúbicos de desplazamiento. Este motor fue adaptado para investigación, modificando principalmente la culata para alojar una cámara de combustión más amplia y cuatro accesos ópticos. Con esta configuración, el motor no es capaz de desarrollar suficiente trabajo en cada ciclo como para que se mantenga funcionando por si mismo. En consecuencia, para mantener las condiciones de trabajo deseadas así como para arrancar, se emplea un motor eléctrico asíncrono (37 KW). El Motor-Maqueta funciona a baja velocidad (500 rpm), para optimizar la lubricación y minimizar el flujo de aire dentro del cilindro.

En la figura [3.1], se muestra un esquema del motor. Éste consta de varios transfers, tanto para la admisión como para el escape. Como ya se ha dicho anteriormente, en la culata de este motor se han instalado unos accesos ópticos para facilitar la visualización de la cámara de combustión. Detallar que la relación de compresión se mantuvo en un valor de 15.7. La cámara de combustión presenta una obertura superior donde va montado el inyector, así como cuatro oberturas laterales a través de las cuales se puede observar el interior de la cámara de combustión. En una de estas oberturas se instala un transductor de presión. En las otras tres se instalan unas ventanas de cuarzo con forma ovalada. La temperatura de la culata, así como la del bloque, se controla por un sistema de refrigeración. La temperatura del refrigerante se fija en unos 353 K, garantizando así, una buena lubricación.

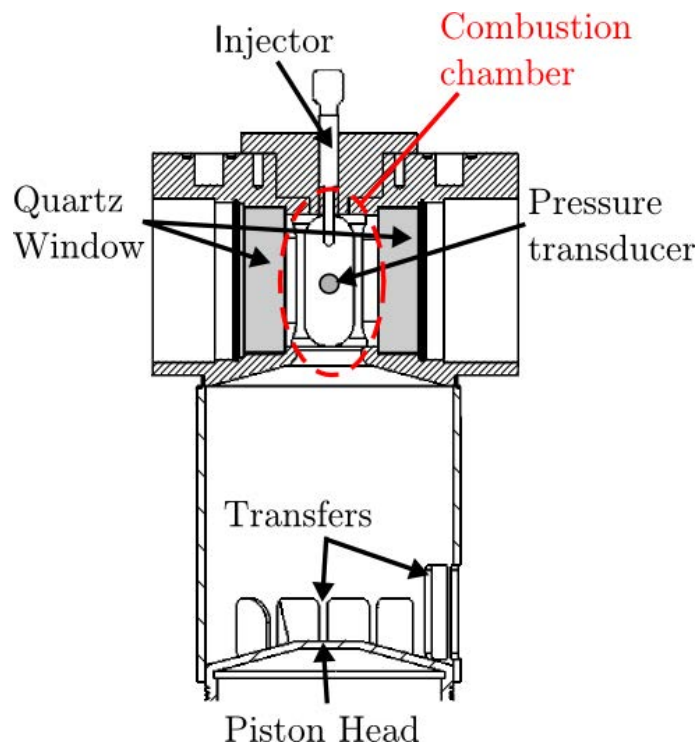


Figura 3.1: Esquema del montaje de la culata y el cilindro.

Teniendo en cuenta las necesidades del estudio, esta instalación puede operarse de dos formas distintas, ya sea para trabajar en condiciones reactivas, así como en inertes. A continuación se detallan ambas condiciones:

- Condiciones reactivas: El aire atmosférico es enviado al interior del cilindro mediante un compresor de palas. Este aire viaja a través de dos unidades acondicionadoras, las cuales se encargan de calentar dicho aire y la otra retira cualquier partícula o líquido que este pueda contener antes de que llegue a la admisión. Los gases de escape de la combustión, son devueltos de nuevo a la atmósfera.
- Condiciones inertes: En este caso, el fluido de trabajo es el nitrógeno. De este modo se puede evitar la combustión manteniendo unas propiedades físicas similares a las del aire. Para poder trabajar con estas condiciones inertes, el circuito de gases del motor trabajará en un bucle cerrado. En la fase de escape del ciclo se tendrá nitrógeno más combustible, que serán transportados a través de un intercambiador y un filtro ciclónico. De este modo se podrán eliminar los restos de aceite y combustible del resto de gases. Acto seguido, el nitrógeno se impulsa de nuevo dentro del cilindro a través de las mismas unidades acondicionadoras descritas anteriormente. El circuito de gas se rellena mediante una válvula electrónica, para así conseguir alcanzar la presión de admisión deseada y también compensar las fugas.

En estos dos modos de operación, para evitar que los gases residuales de otros ciclos influyan en las condiciones dentro del cilindro, se opera el motor en modo "skip-fired", es decir, se inyecta combustible cada 30 ciclos.

La inyección se desarrolla mediante un sistema "common-rail" de Bosch [7], equipado con un inyector piezoeléctrico, que cuenta con un único agujero de un diámetro de salida de $139\mu m$. El orificio del inyector tiene una longitud de 1 mm con forma cónica de un factor $K=1.5$ [8]. Debido a la baja frecuencia de inyección y que el porta-inyector esta refrigerado, la temperatura del combustible inyectado se puede considerar constante. Las condiciones de operación se controlan a través de la presión y temperatura a la entrada del cilindro. La presión se regula con un compresor externo y la temperatura se regula con una serie de resistores eléctricos.

3.2.2 Sistema de inducción láser de plasma

El plasma ha sido inducido mediante el uso de un láser pulsado de alta energía, y un sistema óptico capaz de focalizar el haz de luz dentro de la cámara de combustión. La fuente de radiación es un láser Nd: YAG (*Modelo Continuum Surelite II*) con una lámpara de flash que permite disparar a una frecuencia de 10 Hz. Este láser se ha configurado con una energía por pulso máxima de 350 mJ y una longitud de onda de 1064 nm.

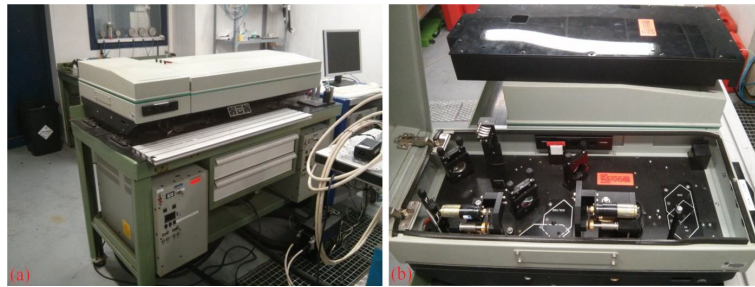


Figura 3.2: Láser Nd: YAG (*Modelo Continuum Surelite II*).

Para que un pulso de estas características fuese capaz de generar plasma, es necesario focalizarlo en la región de interés. Para ello, se ha empleado una lente nBK-7, con una distancia focal de 300 mm. El montaje de todo el sistema fue diseñado para poder permitir el libre posicionamiento del punto focal en un único eje, que coincidió con la dirección de propagación del chorro. Esto fue posible gracias al uso de dos espejos diseñados específicamente para trabajar con la longitud de onda del láser, montados en forma de periscopio. En la figura siguiente se muestra una imagen del montaje empleado. Tanto el segundo espejo como la lente se desplazan verticalmente mediante una mesa de traslación de precisión. Para más detalles sobre el ajuste óptico para la generación del plasma consultar los trabajos previos realizados [9].

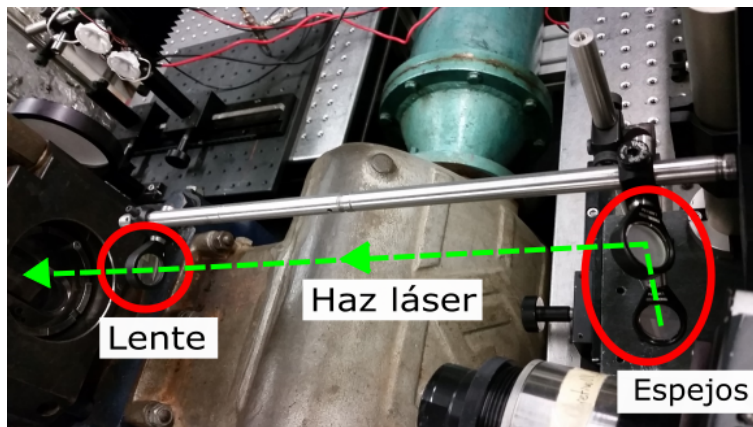


Figura 3.3: Lente y espejos empleados para posicionar el haz del láser.

3.3 Herramientas de Medición

3.3.1 Técnicas de visualización y medida

En la configuración óptica de este proyecto se han usado tres técnicas. Una de ellas es el técnica de extinción de luz (LEI), el cual se basa en la extinción de luz generada por el hollín. Otra técnica es la de luminosidad natural (NL), basada en captar la radiación térmica de la llama. Por último, la quimioluminiscencia del OH*, basada en captar la radiación emitida de forma espontánea por este radical. Todo el montaje se puede ver en la figura [3.4].

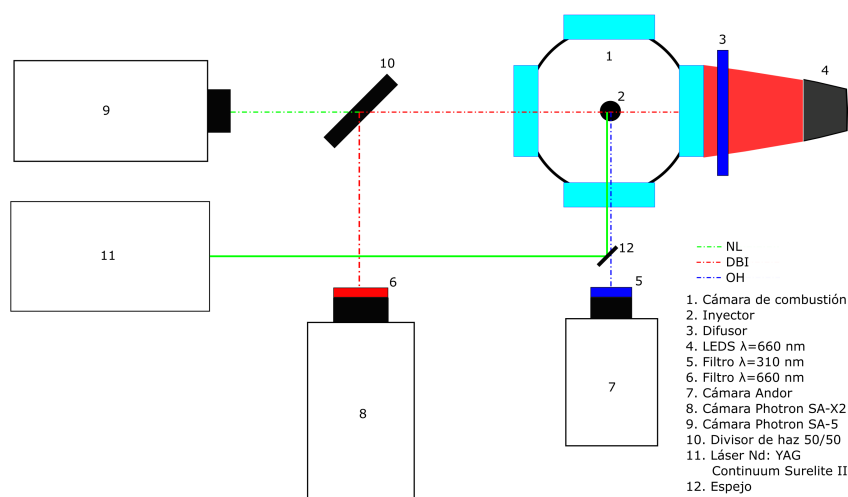


Figura 3.4: Disposición del montaje del motor maqueta.

Quimioluminiscencia de OH

Se sabe que gran parte de la formación de los radicales OH aparece durante la combustión, donde tiene lugar la oxidación del combustible y las partículas de hollín. Estos radicales emiten radiación electromagnética a una longitud de onda aproximada de 310 nm. Si se emplea el filtro adecuado en el montaje, esta radiación puede aislarse del resto para poder

ser capturada por una cámara. Esta radiación ya ha sido empleada en estudios previos, como el de R. Payri et al. [10] para el cálculo de la longitud del despegue de la llama, que a partir de este momento se nombrará como LOL.

El concepto de la rutina para calcular el lift-off es relativamente sencillo, si se omiten todos los ajustes y filtros que se requieren para calcular con precisión el parámetro que se desea. Dicha rutina se puede dividir en dos partes. En la primera parte, los pixels de la imagen correspondientes a radiación de OH se separan de la radiación de fondo, mediante un procedimiento que se conoce comúnmente como segmentación. Basándose en un nivel umbral, que se define teniendo en cuenta el rango dinámico de la imagen, se clasifica como parte de la llama todos los pixels con un nivel de intensidad superior a éste. Esto permite calcular el centro de gravedad de cada llama en cada imagen. Esto sirve para localizar el eje de la llama y se tienen en cuenta para calcular el LOL, puesto que el inicio de la llama se encontrará entre el centro de gravedad y el inyector.

La segunda parte de la rutina se encarga de detectar el LOL aguas arriba del centro de gravedad calculado anteriormente. Para ello, el algoritmo localiza los diez pixels de la llama más cercanos al inyector. El promedio de la distancia a la que se encuentra cada uno es el LOL. Además, conociendo la relación en milímetros de la realidad y píxeles de la imagen, se puede realizar la conversión.

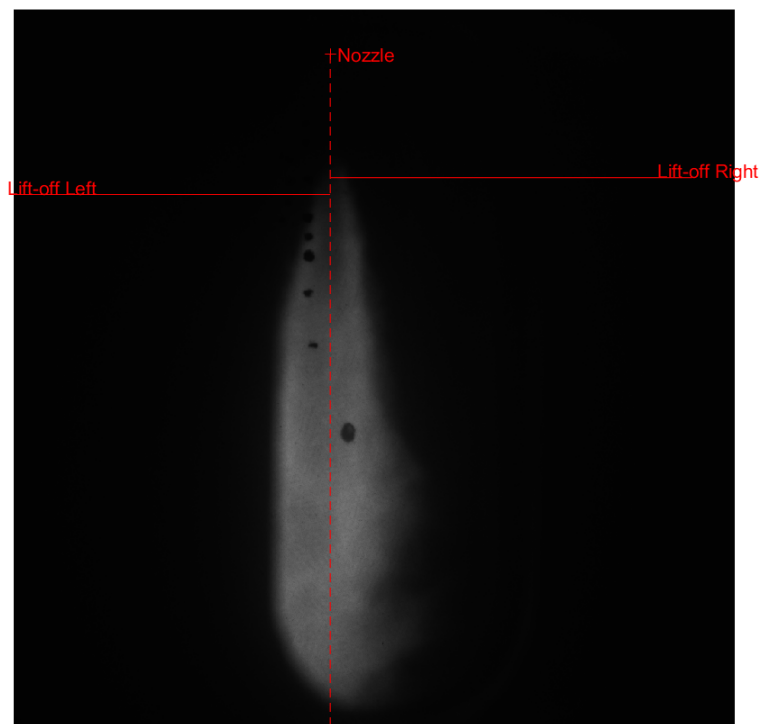


Figura 3.5: Imagen post-procesada de la localización del LOL.

Para registrar la quimioluminiscencia se utilizó una cámara intensificada “lenta”, Andor ICCD iStar DH334T-18H-83. Esta se equipó con un objetivo ultravioleta Bernhard Halle con una focal de 100mm y una apertura máxima $f/2$. Además delante de la cámara se instaló un filtro interferencial centrado 310 nm y con un ancho de banda de 10 nm,

para descartar cualquier radiación procedente de la llama que no correspondiera con la del radical OH. Dado que la frecuencia de adquisición de la cámara es menor a 1 Hz, solo es posible obtener una imagen cada ciclo de combustión. Para esta aplicación, y debido a la baja intensidad de radiación de este radical, se ha empleado un tiempo de exposición de 1 ms, desde 1 ms hasta 2 ms aSOE. El Sistema óptico ofrecía una relación pixel/mm de 9,1.

Luminosidad natural

La técnica de luminosidad natural (NL) se basa en registrar la radiación procedente de la llama, en un amplio rango de longitudes de onda. Dependiendo de la fase de la combustión en la que se encuentre, esta radiación procede de reacciones químicas (como en el caso de la quimioluminiscencia) o de la radiación térmica del hollín. Ésta última suele ser la predominante, por lo que NL está reconocida como una herramienta útil para estudiar la presencia y evolución del hollín dentro de la llama. Es una técnica comúnmente utilizada puesto que es muy fácil de aplicar. Sin embargo, solamente permite un análisis cualitativo puesto que es muy difícil correlacionar la cantidad de radiación registrada con la concentración de partículas de hollín. De hecho, la intensidad de ésta depende también de la temperatura a la que se encuentren y no solo de la cantidad.

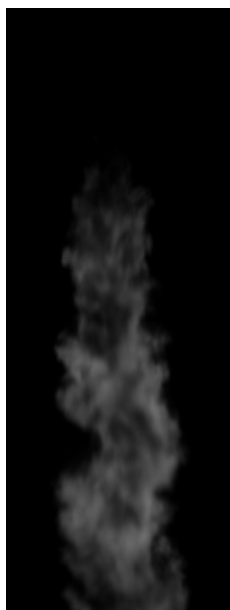


Figura 3.6: Instantánea extraída de la secuencia de video de la técnica NL.

Para su aplicación, se empleó una cámara de alta velocidad Photron SA-5. Esta se equipó con una lente Carl Zeiss de focal 100 mm y una apertura máxima de $f/2$. Como se explica más adelante, se empleó un LED que emite en 660 nm para la técnica de extinción de luz. Para evitar que esta Fuente de luz contamine la señal de NL, se instaló un filtro paso alto en frente de la cámara. Este solo permitía registrar longitudes de onda mayores a 850 nm, que son muy importantes en la radiación térmica de cualquier cuerpo. La cámara se configuró para grabar imágenes a una frecuencia de 25.000 Hz, con un tamaño de 336x896 pixels y una resolución de 11 pixel/mm.

Extinción de luz

La técnica de extinción de luz (LEI) se basa en la atenuación del haz de luz que atraviesa la nube de hollín. Esta atenuación se debe a la dispersión y a la absorción descrita por la ley de Lambert-Beer. Si las propiedades de extinción del hollín se consideran constantes a lo largo de toda la nube de hollín, la extinción de luz se puede expresar como:

$$I = I_0 * \exp(-KL * L) \quad (3.1)$$

Donde I es la intensidad atenuada y I_0 es la intensidad original. KL es el coeficiente de extinción dimensional de la nube de partículas y L es el tamaño de la nube en la dirección del haz de luz.

Este factor KL es elegido como herramienta de medida del hollín como, al igual que se ha hecho ya en otros trabajos como el de C. Micó [4]. Este parámetro es proporcional a la concentración de hollín y al ancho de la llama y, por tanto, se considera representativo de la cantidad de hollín presente en la llama.

En este trabajo, la cámara de combustión es iluminada a través de uno de los accesos ópticos con un LED cuya emisión está centrada en 660 nm. Con este, en combinación con un difusor, genera una iluminación uniforme que es capturada por una cámara de alta velocidad instalada al otro lado de la culata. Así, la luz atraviesa la llama y es atenuada hasta que alcanza el sensor de la cámara. Sin embargo, la llama a su vez emite radiación térmica que es muy intensa. Por ello, la señal registrada es una combinación de luz de LED y radiación de llama. Como solución, se utiliza un LED pulsado a la mitad de la frecuencia de adquisición de la cámara. Con ello se consigue que ésta última registre un fotograma con el LED iluminando seguida de otro fotograma con el LED apagado. Así, se dispone de una referencia para eliminar el aporte de la radiación de llama cuando el LED está encendido.

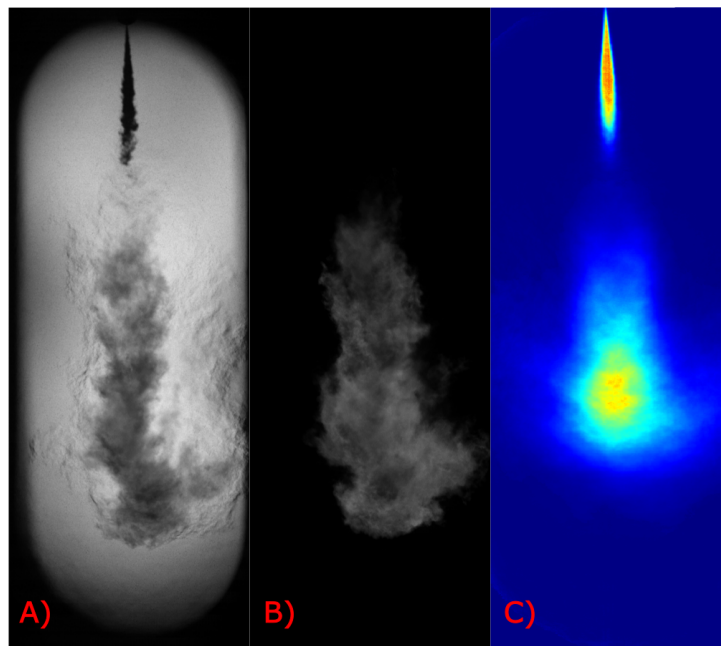


Figura 3.7: Imágenes tomadas con la técnica LEI. A) con LED; B) sin LED; C) absorción resultante (imagen post-procesada).

Para esta técnica, se empleó una cámara de alta velocidad Photron SA-X2, equipada con un objetivo Carl Zeiss de focal 100 mm y apertura máxima $f/2$. Además, se instaló delante de la cámara un filtro interferencial centrado en 660 nm y con un ancho de banda de 10 nm para minimizar la cantidad de radiación de llama registrada. La cámara se configure con una frecuencia de adquisición de 25.000 Hz, con un tamaño de 336x896 pixels y una resolución de 11 pixel/mm. Finalmente, como puede verse en la figura [3.4], la limitación en la cantidad de accesos ópticos obligó a utilizar el mismo para LEI y NL. Por ello, se instaló un separador de haz que transmitía el 50% de la luz incidente hacia la cámara correspondiente a NL y reflejaba el otro 50% hacia la cámara instalada para LEI.

3.3.2 Análisis de señal de presión

Para medir la presión en el cilindro se ha empleado un transductor de presión AVL GU13P junto con un amplificador de carga Kistler 5011. La presión se ha registrado con una frecuencia de muestreo de 6 kHz. Para cada ensayo y cada repetición, se registran dos ciclos de motor consecutivos. El primero es de arrastre, es decir, no hay combustión. El segundo es con combustión.

El registro de la presión dentro del cilindro permite, entre otras cosas, estimar las condiciones termodinámicas dentro del mismo. Para ello, se ha seguido un procedimiento estándar en CMT-Motores térmicos, descrito por J.V.Pastor et al. [11]. Este se basa en aplicar la primera ley de la termodinámica al volumen del cilindro, teniendo en consideración el soplado de aire hacia el cárter, la transferencia de calor y las deformaciones mecánicas que sufre el motor.

Por otro lado, la comparación entre la evolución de presión instantánea entre un ciclo de arrastre y un ciclo de combustión, permite calcular parámetros como el retraso de encendido (ID) o la liberación de calor.

El ID es definido como el tiempo que transcurre desde que se comanda el inyector para que comience la inyección (SoE) hasta que el efecto de la combustión es detectable a través de la presión en el cilindro. Cuando esta se inicia, la presión en la cámara de combustión asciende rápidamente aumentando de forma repentina la diferencia entre el ciclo con combustión y el ciclo en arrastre. Por tanto, el criterio que se ha seguido es que la combustión se inicia cuando se detecta que el valor de la diferencia de presiones entre ambos ciclos es, al menos, mayor al doble de la desviación estándar calculada para un intervalo móvil de la misma señal.

En lo que respecta a la liberación de calor, su cálculo está basado en la aplicación de la primera ley de la termodinámica al cilindro [12]. El principal parámetro que se extrae es la tasa de liberación de calor en función del ángulo de giro del cigüeñal (J/CAD), que indica la cantidad instantánea de energía liberada por el combustible durante la combustión. De ahora en adelante esta tasa de liberación de calor se referirá como RoHR (Rate of Heat Release). La ecuación que rige el cálculo del RoHR es:

$$RoHR = masa \times C_{v_{aire}} \times \nabla(\Delta T) + \Delta P \times 10^5 \times \nabla V \quad (3.2)$$

La *masa* se refiere a la masa de aire atrapada tras el cierre de las lumbreras. Esta se calcula a partir de las condiciones termodinámicas dentro del cilindro cuando ocurre el cierre. El calor específico del aire ($C_{v_{aire}}$) depende de la temperatura del mismo durante el ciclo de combustión. El gradiente de la diferencia de temperaturas ($\nabla(\Delta T)$) depende también del cálculo de la temperatura en la cámara durante la fase de combustión y de la simulación de la temperatura de arrastre a partir de la caracterización del motor. La diferencia de presiones (ΔP) es calculada a partir de la presión en el ciclo de combustión y ciclo de arrastre. Por último el gradiente del volumen (∇V) depende de el volumen en cada instante durante el ciclo, y se obtiene a partir de los parámetros geométricos del motor. Finalmente, es importante destacar que la integración de RoHR en función del ángulo de giro del cigüeñal permite obtener la cantidad total de calor liberado (HR) en un ciclo de combustión.

3.3.3 Modelo unidimensional del chorro

Para poder estimar las condiciones locales en las que se emplea el sistema de encendido por láser, se ha empleado un modelo unidimensional que permite predecir el comportamiento del chorro cuando es inyectado bajo unas condiciones de contorno inertes. La herramienta utilizada en este estudio, así como en muchos otros, ha sido desarrollada íntegramente en el CMT-Motores Térmicos [13] [14].

Hay una serie de hipótesis aplicadas al modelo que se consideran para este estudio:

- Se considera que el chorro es simétrico alrededor de eje.
- Se considera que el flujo turbulento esta completamente desarrollado.
- El ángulo del cono del chorro es definido a partir del contorno externo del chorro.
- El número de la turbulencia de Lewis se asume que es igual a 1.

- Se asume que la presión es constante en todo el chorro.
- Se considera el flujo local como homogéneo, dando lugar a un equilibrio local tanto térmico como cinético.

Para cada sección se formulan las ecuaciones de conservación del momento axial y de la masa de combustible. Sabiendo el ángulo del cono, el cual es definido previamente, y la densidad local, se puede proceder a calcular las integrales que definen el modelo.

El ángulo del cono es determinado manualmente mediante la propia herramienta DICOM, este se determina mediante el ajuste de la curva de penetración del chorro en condiciones inertes con un ángulo establecido cualquiera, con la curva de penetración del chorro experimental. Se establece el criterio de que solamente se necesita que la curva se pueda ajustar hasta una distancia de 0.04 m de penetración. Este criterio se debe a que a partir de esa distancia, no se cumplen las hipótesis del modelo de flujo, dadas las características del motor. Este ajuste se muestra en la figura [3.8].

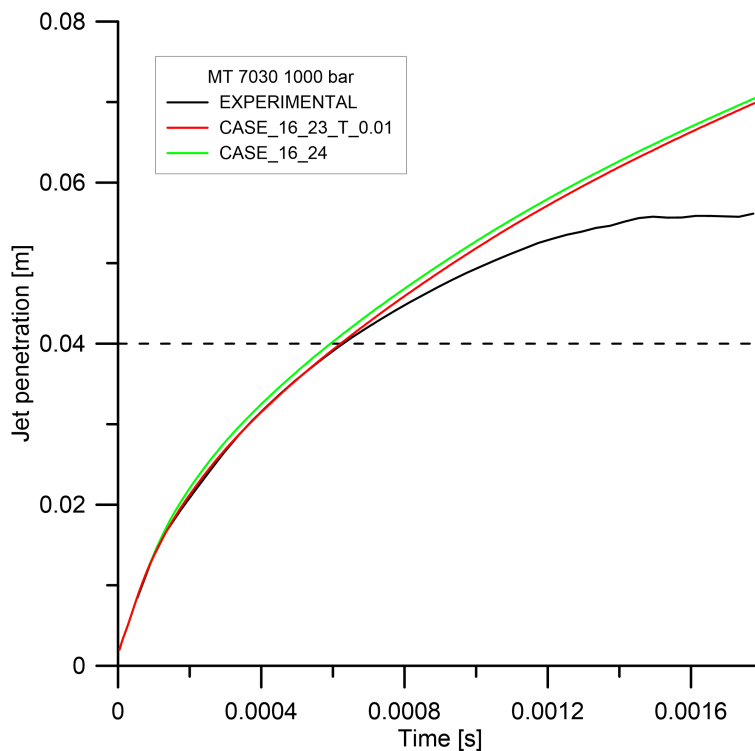


Figura 3.8: Ajuste con la curva de penetración del chorro experimental para la elección del ángulo del cono.

En este ejemplo, se han ajustado las curvas de penetración para varios ángulos y transitorios para la mezcla 7030 con la condición de MT y una presión de inyección de 1000 bar. La curva de color negro es la experimental; la verde es con un ángulo doble de 16° y 24° sin transitorio; la roja también es con un ángulo doble de 16° y 23°, pero este si cuenta con un transitorio establecido en una distancia de 0.01 metros. Se puede ver como para este caso concreto la curva que mejor ajusta hasta los 0.04 metros de penetración es la curva roja.

Este modelo, entre otras muchas cosas, permite calcular la fracción de mezcla aire/combustible. Ésta sería de mucha utilidad para verificar, si dándose condiciones favorables respecto al punto de funcionamiento del sistema de encendido por plasma, puede este encender o no debido a la concentración de combustible en la zona.

3.4 Condiciones de operación

Las condiciones termodinámicas en las que se han realizado los ensayos abarcan un rango de temperaturas desde los 780 K hasta los 870 K. Éstas han sido definidas a partir del trabajo de J.V. Pastor et al. [9], que se ha tomado como referencia para este estudio. Así, se pueden diferenciar tres puntos de operación que se muestran en la siguiente tabla:

	LT	MT	NO
Temperatura [K]	780	830	870
Densidad [kg/m^3]	22.8	22.8	22.8

Tabla 3.1: Condiciones de funcionamiento del motor.

Para estos tres puntos de operación, se ha hecho un barrido de presiones de inyección desde los 1000 hasta los 1500 bar. En cuanto a combustible, se han empleado tres diferentes. Estos son mezclas de diferentes proporciones de diésel y gasolina comerciales. Para identificar estas mezclas, el nombre que se le ha dado corresponde con el porcentaje de cada componente en dicha mezcla, siendo los dos primeros números el porcentaje de gasolina en volumen y los otros dos el porcentaje de diésel en volumen. Por tanto, las tres mezclas son:

Porcentaje [%]	B0	5050	7030
Gasolina	0	50	70
Diésel	100	50	30

Tabla 3.2: Mezclas empleadas en el estudio.

Las propiedades de los combustibles primarios empleados para la formación de las mezclas son:

Propiedades	Diésel (B0)	Gasolina (E10-98 EN 228)
Fórmula	$C_{15}H_{31.9}$	$C_{6.43}H_{11.97}O_{0.21}$
Peso molecular [g/mol]	211.9	105.34
T. Autoignición [K]	[527 - 558]	673
%C - %H - %O	86.6 - 13.4 - 0	63.5 - 13 - 3.5
Densidad (15 °C) [kg/m^3]	834.7	755
Nº Octano	-	[95 - 98]
Nº Cetano	53	-

Tabla 3.3: Propiedades de los combustibles primarios que forman las mezclas.

Por último, se definen las condiciones de trabajo del Sistema de encendido por plasma. Este se ha podido ajustar con la distancia a la que se dispara el pulso láser con respecto al inyector, la cual se mide en el eje longitudinal del chorro; y el tiempo de retraso en el que empieza a energizarse la zona desde que se comanda el inyector (aSoE). Cabe destacar que con el combustible B0 no se usa el láser, dado que se ha empleado como referencia para el proceso de auto-encendido.

La distancia a la que se dispara el láser se ha escogido, dependiendo de la reactividad de la mezcla. Por eso, para el combustible 5050 se definieron puntos diferentes a los del 7030. Estos se resumen en la tabla [3.4].

5050	7030
2.5 mm	15 mm
5 mm	17.5 mm
10 mm	22.5 mm
20 mm	32.5 mm
30 mm	42.5 mm

Tabla 3.4: Posición del pulso láser respecto al inyector en su eje longitudinal.

Los tiempos de retraso en los que se dispara el láser, por contra, sí que se definieron igual para todas las condiciones de operación y presiones de inyección. Estos fueron 400, 800, 1200 y 1600 μs . De este modo, en la tabla [3.5] se muestra la combinación de retrasos y distancias empleadas para los distintos ensayos.

Tiempo de retraso del plasma (aSOE) [μs]	5050	7030
800	2.5 mm	15 mm
800	5 mm	17.5 mm
800	10 mm	22.5 mm
400; 800; 1200; 1600	20 mm	32.5 mm
800	30 mm	42.5 mm

Tabla 3.5: Puntos de funcionamiento del sistema de encendido por plasma utilizados en los ensayos.

Capítulo 4

Aplicación del sistema de encendido por plasma para el fasado espacial y temporal del proceso de combustión.

4.1 Introducción

Como se ha comentado en el capítulo [3], la aplicación del sistema de encendido por plasma para controlar el proceso de combustión en condiciones desfavorables (como las de baja temperatura y aquellas que tienen un alto contenido de combustible de baja reactividad) es clave para garantizar la combustión en todo el rango de funcionamiento del motor.

En el presente capítulo, en primer lugar se van a definir los límites de funcionamiento de los diferentes combustibles, para el rango de condiciones de operación de motor indicadas en el capítulo [3]. Esto permitirá identificar aquellas condiciones en las que el sistema de encendido por plasma es necesario. El principal criterio que se va a aplicar es el de la efectividad del proceso de encendido por compresión. Aquellos casos en que el auto-encendido no tiene lugar el 100% de los ciclos de combustión constituyen el principal rango de aplicación del sistema de encendido por plasma. Sin embargo, como se verá más adelante, este no es el único criterio a seguir. Un estudio más detallado de ciertos parámetros característicos de la combustión (como tiempo de retraso de encendido, el despegue de llama o la liberación de calor) pueden ayudar a identificar condiciones donde el encendido por plasma puede suponer una gran mejora, a pesar de que el combustible sea capaz de auto-encenderse por sí mismo.

La segunda parte del capítulo está enfocada a evaluar el funcionamiento del sistema de encendido por plasma, para las condiciones previamente mencionadas. Se analizarán los efectos generados por la variación del instante en el que el plasma es generado y también por la variación de su posición dentro de la cámara de combustión del motor.

Este capítulo está estructurado en tres secciones. La primera pretende identificar qué condiciones son desfavorables para la combustión de encendido por compresión. Acto seguido, en la segunda sección se evalúan los efectos del encendido por plasma sobre el proceso de combustión, para las condiciones identificadas en la sección anterior. Para finalizar, se presentan las conclusiones del capítulo.

4.2 Evaluación del proceso de auto-encendido

Como se ha comentado anteriormente en la introducción, en esta sección se va a analizar en qué condiciones se da el auto-encendido y como queman los diferentes tipos de combustibles.

En primer lugar, se debe determinar si en algún caso alguno de los combustibles considerados en este estudio no es capaz de iniciar la combustión por sí mismo. Para ello, se va a evaluar la efectividad del encendido por compresión. En la tabla [4.1], se muestran todos los resultados para todas las condiciones de ensayo y las tres presiones de inyección de los tres combustibles. Los resultados correspondientes al combustible 5050 no se muestran dado que presenta un 100% independientemente del caso. La efectividad está calculada en tanto por cien y representa que porcentaje de las repeticiones de cada ensayo hay auto-encendido con éxito y cuáles no.

	LT			MT			NO		
	B0	7030	5050	B0	7030	5050	B0	7030	5050
Inyection Pressure [bar]									
500	100	73	100	100	100	100	100	100	100
1000	100	13	100	100	100	100	100	100	100
1500	100	7	100	100	100	100	100	100	100

Tabla 4.1: Tabla de efectividad del encendido por compresión para los diferentes combustibles.

En la tabla se observa que el 7030 es el único combustible, que bajo determinadas condiciones, no alcanza el 100% de efectividad. Además se observa una clara tendencia a la disminución de esta cuanto menor es la temperatura de funcionamiento. También es posible observar que, para el caso más desfavorable (LT para 7030), conforme aumenta la presión de inyección la efectividad también cae drásticamente. Cuanto menos favorables son las condiciones termodinámicas para provocar el encendido por compresión, más fallos se darán. De esta tabla se extrae, por tanto, que para el combustible 7030 en condiciones de baja temperatura el sistema de encendido por plasma es necesario para garantizar el correcto funcionamiento de todos los ciclos de combustión.

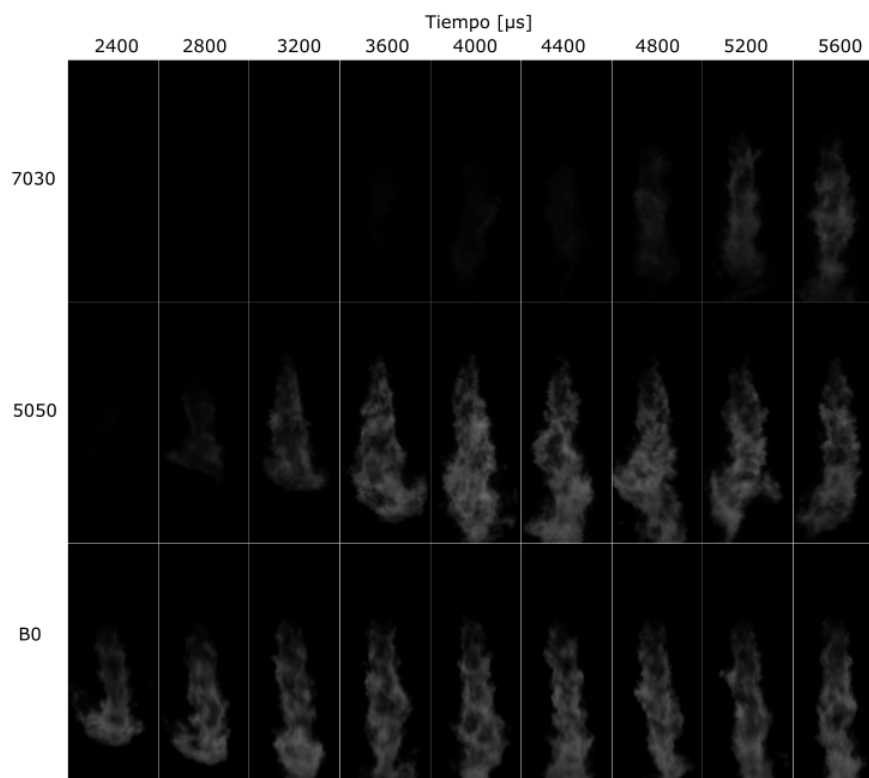


Figura 4.1: Secuencia de imágenes de luminosidad natural (NL) del proceso de combustión de B0, 5050 y 7030 a ρ =[densidad] y T =[temperatura] y $P_{inj}=1000$ bar.

Sin embargo, una efectividad del 100% de auto-encendido no garantiza el correcto desarrollo posterior de la combustión. Como ejemplo, la figura [4.1] representa la evolución de la llama en el tiempo, para los tres combustibles, en condiciones MT y 1000 bar de presión de inyección y sin asistencia de encendido por plasma. Estos están ordenados de arriba a abajo de mayor a menor proporción de gasolina.

De esta figura se pueden sacar dos conclusiones principales. La primera es que a mayor proporción de gasolina en la mezcla, la combustión se retrasa en el tiempo. Esto se puede apreciar en el caso más extremo del combustible 7030, donde empieza haber combustión a $4800 \mu s$ aSOE. Se puede apreciar que es mucho más tarde que para el combustible de referencia B0, cuya radiación comienza a ser visible mucho antes (incluso antes del primer instante representado en la figura). Se observa el mismo fenómeno en el combustible 5050, lo cual confirma la tendencia de que a mayor porcentaje de gasolina en la mezcla, mayor retraso en el auto-encendido. Esto es debido a que la gasolina tiene una mayor resistencia al auto-encendido que el diésel, influyendo así en la reactividad de las mezclas. Estos resultados concuerdan con las observaciones realizadas por W.Thoo [15], en el cual se puede verificar la tendencia mencionada anteriormente.

La segunda conclusión es que la intensidad de la luminosidad de la llama varía entre los distintos combustibles. La tendencia que se puede observar es que a mayor proporción de gasolina en mezcla, la intensidad es menor. Este efecto es especialmente apreciable al comparar 7030 y B0 y puede estar relacionado con la cantidad de hollín que se forma en la llama. Este aspecto será analizado más en detalle en el capítulo siguiente.

La figura [4.2] resume el efecto de las propiedades del combustible sobre el retraso del encendido (ID), para todas las condiciones de ensayo definidas en este trabajo. En ella se compara el ID de cada combustible con el de B0, para resaltar las diferencias mencionadas.

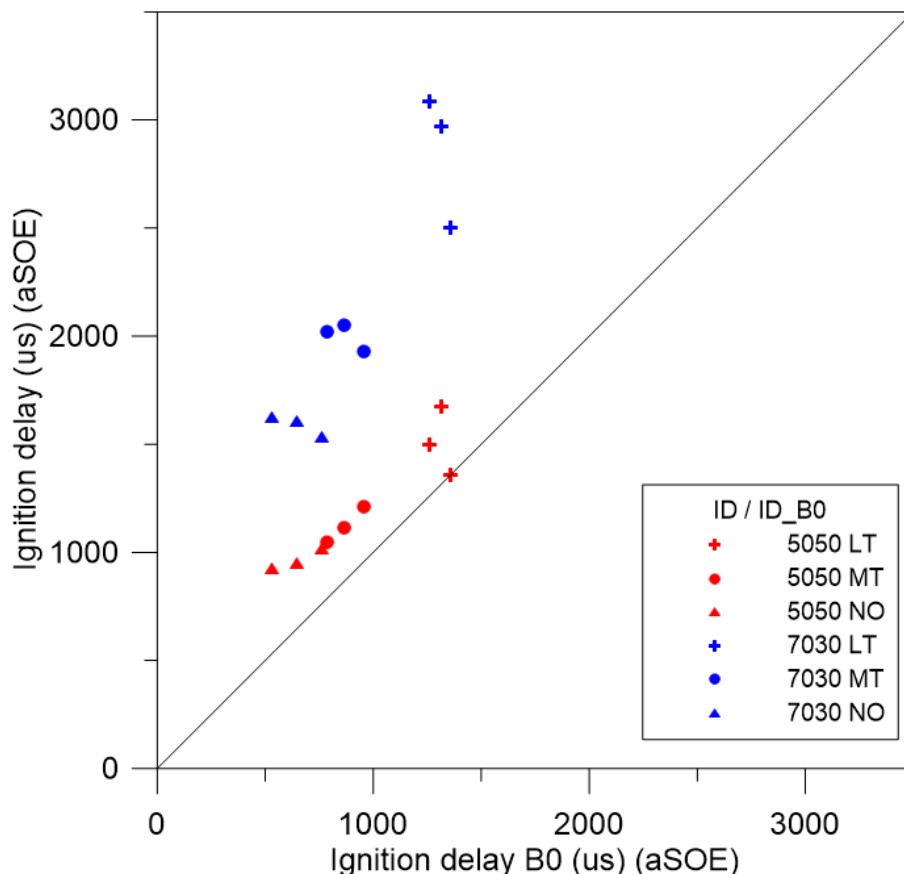


Figura 4.2: Relación del ID de cada combustible con el de referencia (B0).

La figura [4.2] se representa del siguiente modo: en el eje de abscisas se muestra el ID (aSOE) del combustible B0 para para todas las condiciones termodinámicas y presiones de inyección consideradas en este trabajo; en el eje de ordenadas se muestra el ID (aSOE) de cada combustible en las mismas condiciones de ensayo. La línea visectriz de la gráfica representa el combustible B0, por lo que todo punto que esté por encima de esta línea significa que tiene un retraso de auto-encendido mayor al del diésel.

Se observa una clara diferencia entre el combustible 7030 y el 5050. La tendencia es que al disminuir la proporción de gasolina, el combustible se asemeja más al diésel, lo que concuerda con lo observado en la figura [4.1]. Así, se aprecia que para la mayoría de condiciones el 5050 estará bastante cerca de la línea de referencia. Esto sugiere que, posiblemente, no haga falta encendido por plasma para este combustible. No obstante, con el combustible 7030 ocurre lo contrario. En general para todas condiciones se aleja bastante del diésel lo que sugiere que el sistema de encendido por plasma en estos casos podría ser más necesario. Concretamente, este combustible presenta entre un 37% y un 42% de variación de ID con respecto al B0 mientras que para el 5050 es del 7% al 20%.

Para analizar cuál es el efecto de esas diferencias sobre el desarrollo de la combustión, se puede emplear la medida de presión en la cámara de combustión. La finalidad es ver si

quemar todos los combustibles igual en todas las condiciones de funcionamiento.

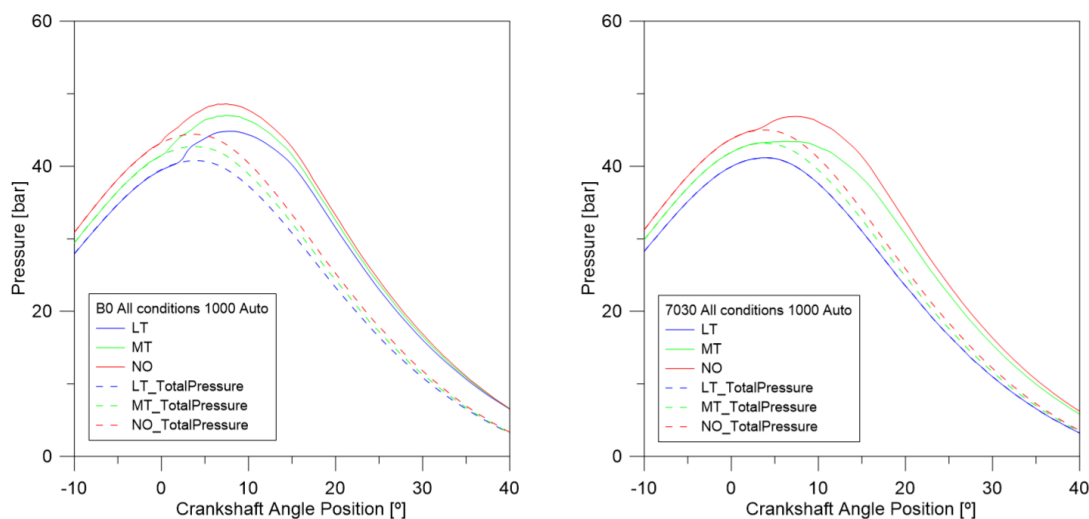


Figura 4.3: Comparación entre la presión en la cámara de combustión de un ciclo de combustión y su correspondiente arrastre, para B0 (izquierda) y 7030 (derecha) y $P_{inj} = 1000$ bar.

En la figura [4.3] se muestra la evolución de la presión en la cámara de combustión, donde el eje de abscisas es el ángulo del cigüeñal y el eje de ordenadas es la presión. Las curvas con líneas discontinuas representan la presión de un ciclo de arrastre. Por otra parte, las líneas continuas representan la presión en un ciclo con combustión. Los diferentes colores representan las distintas condiciones experimentales, las cuales son: baja temperatura (LT), media temperatura (MT), y nominal (NO). La gráfica de la izquierda representa el B0, y la gráfica de la derecha representa el 7030.

Las curvas correspondientes a B0 se pueden considerar como una buena referencia de un proceso de combustión correcto, para las distintas condiciones de ensayo. El incremento de presión que se observa entre una curva con combustión y su correspondiente curva de arrastre es debido a la energía liberada por el combustible al quemar. Teniendo esto cuenta, a simple vista se ve como para LT no está quemando prácticamente el combustible 7030, ya que la curva azul con línea continua (combustión) se asemeja mucho a la discontinua (arrastre). Para MT sí se observa que quema mejor pero, aun así, se diferencia mucho de la referencia. Finalmente, para NO la curva de combustión es muy semejante a la del B0, aunque la máxima presión alcanzada es ligeramente inferior.

Como consecuencia de que los combustibles no queman igual, se puede deducir que tampoco la energía liberada en la combustión debe ser igual. Esto indica que el siguiente paso es analizar cuanta energía se libera durante la combustión. En la figura [4.4], se muestran tanto la tasa de liberación de calor (RoHR), como el calor total liberado (HR) por ángulo de giro del cigüeñal. En ambos casos, se basan en un cálculo de liberación de calor aparente, como se describe en el capítulo [3].

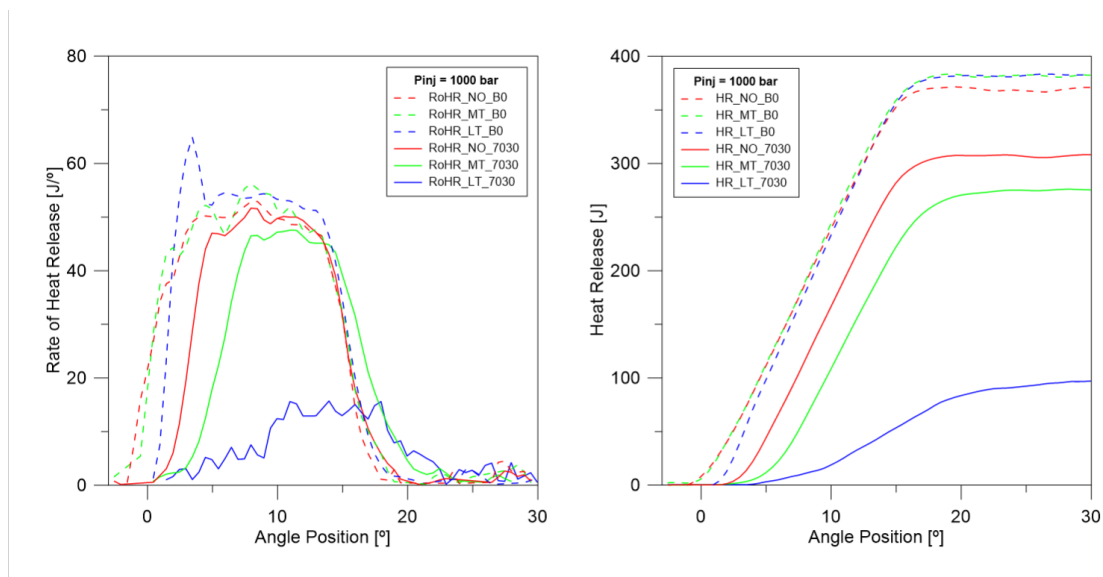


Figura 4.4: RoHR (izquierda) y HR (derecha) en función del ángulo de giro del cigüeñal, para los combustibles B0 y 7030 y $Pinj = 1000$ bar.

La gráfica de la izquierda muestra la liberación de calor por ángulo de giro del cigüeñal (eje de ordenadas). La gráfica de la derecha muestra en el eje de ordenadas el calor liberado acumulado por ángulo de giro del cigüeñal. Las curvas con líneas discontinuas representan el combustible B0, el cual siempre es la referencia como se ha explicado anteriormente. Las curvas con líneas continuas representan el combustible 7030. Los colores, como anteriormente en la figura [4.3], representan cada condición de motor, las cuales son LT, MT y NO.

Si se observa la gráfica de la izquierda de la figura [4.4], el primer punto que destaca es que en todas las condiciones el calor liberado siempre es inferior para el 7030. Esto coincide con lo observado con la figura anterior. También se aprecia una tendencia a disminuir dicha liberación de calor cuando la condición de ensayo es de menor temperatura, como en el caso de LT comparado con MT o con NO. Concretamente, para el caso de baja temperatura, la cantidad de calor liberado es muy pequeña comparada con la equivalente para B0. Esto queda confirmado al calcular la cantidad total de calor liberado, que se representa en la gráfica de la derecha de la figura [4.4]; confirmando lo que se deducía de la señal de presión en cámara.

Como puede verse, aquellas condiciones para las que se obtienen mayores tiempos de retraso de encendido con el combustible 7030 muestran una liberación de energía mucho menor que en el caso del diésel. Esto se debe, principalmente, a que un retraso excesivo provoca que la combustión comience ya durante la carrera de expansión del pistón. Así, el combustible no es capaz de incrementar la presión y temperatura de forma notable dentro de la cámara de combustión. Esto dificulta el desarrollo de la combustión por difusión y, por tanto, reduce la liberación de energía.

Estos análisis de la liberación de calor no valen para identificar inequívocamente qué puntos de funcionamiento del motor para los combustibles seleccionados requieren del sistema de encendido por plasma. Sin embargo, sí confirman que incluso habiendo 100% de efectividad, la combustión no llega a ser igual que si se emplea diésel.

Tiempo en cuenta todo lo anterior, se puede concluir que el retraso del auto-encendido para combustibles con mayor proporción de gasolina es mayor que para el B0. Esto afecta claramente al desarrollo y las “prestaciones” de la combustión. En este trabajo, el combustible 7030 representa el caso más extremo no siendo capaz, en algunas condiciones de funcionamiento, de quemar por sí solo. Por ello, en la siguiente sección se analizarán los efectos del sistema de encendido por plasma para este combustible, considerándose los resultados extensibles para cualquier mezcla con menor proporción de gasolina.

4.3 Comportamiento del sistema de encendido por plasma

Haciendo referencia a la sección anterior, a estas alturas ya se conoce como es el comportamiento de la combustión por auto-encendido, y ya se tiene una orientación de en qué condiciones no quemaría o quemaría muy mal cualquiera de las dos mezclas de combustible consideradas. Es precisamente en esas condiciones donde se plantea el uso del sistema de encendido por plasma. En esta sección, por tanto, se ha puesto a prueba el sistema. Para ello, se ha realizado un estudio en el que se modifican la posición y el instante en el que se genera el plasma con el fin de analizar su efecto sobre el desarrollo posterior de la combustión. Sin embargo, esta sección solo se va a centrar en el efecto sobre ID y la distancia de despegue de la llama, puesto que está demostrado [2] que son muy importantes para el posterior desarrollo de la misma y la formación de contaminantes. Se ha dejado a parte la evolución de la combustión y la formación de hollín para analizarla más en detalle en el capítulo siguiente.

Para presentar los resultados de este estudio, se escogió una condición intermedia como es MT. A priori, ésta debería ofrecer un comportamiento más estable que LT (lo que simplifica el análisis), a la vez que muestra diferencias más acentuadas entre combustibles en comparación con condiciones de mayor temperatura dentro del cilindro. Las distintas configuraciones de plasma empleadas son las descritas en el capítulo [3].

En primer lugar, se ha considerado conveniente analizar el funcionamiento del sistema de encendido por plasma desde el punto de vista de su efectividad. Para ello, se presentan a continuación dos tablas correspondientes a las distintas configuraciones del sistema de plasma ensayadas, en condiciones de media temperatura (MT). La tabla [4.2] muestra diferentes retrasos de generación de plasma para una misma posición mientras que la tabla [4.3] muestra diferentes posiciones de generación de plasma para un mismo retraso. Estas nos permiten determinar en qué puntos, puede funcionar o no el encendido por plasma.

Plasma Delay(aSOE)[us]	Success rate(1000 bar)[%]	Success rate(1500 bar)[%]
400	0	0
800	97	97
1200	97	100
1600	100	100

Tabla 4.2: Tabla de efectividad del encendido por plasma para combustible 7030, en los diferentes retrasos. Condición MT, Pinj= 1000 y 1500 bar.

Plasma Position[mm]	Success rate(1000 bar)[%]	Success rate(1500 bar)[%]
15	97	97
17.5	100	97
22.5	100	97
32.5	97	97
42.5	3	0

Tabla 4.3: Tabla de efectividad del encendido por plasma para combustible 7030, en las diferentes posiciones. Condición MT, P_{inj} = 1000 y 1500 bar.

Como se puede observar en ambas tablas, la distancia a la que se genera el plasma o su retraso no condiciona a priori la efectividad del encendido del combustible. En general, se observan unos valores de efectividad en torno al 97 y 100 %, que se puede considerar bastante elevados. Sólo se observan problemas en la posición más lejana (42.5 mm) y el retraso más corto (400 μs), para los que la eficiencia apenas alcanza el 3%.

El mismo estudio se ha realizado para el combustible 5050 en las condiciones de funcionamiento del motor de baja y media temperatura (LT y MT), así como nominal (NO). En las tablas [4.4] y [4.5] se muestra la efectividad del sistema de encendido por plasma para los diferentes retrasos del plasma, así como sus posiciones.

Plasma Delay(aSoE)[us]	Success rate(1000 bar)[%]	Success rate(1500 bar)[%]
400	50	97
800	100	100
1200	100	100
1600	100	100

Tabla 4.4: Tabla de efectividad del encendido por plasma para combustible 5050, en los diferentes retrasos. Condición MT, P_{inj} = 1000 y 1500 bar.

Plasma Position[mm]	Success rate(1000 bar)[%]	Success rate(1500 bar)[%]
2.5	0	0
5	0	0
10	100	97
20	100	100
30	100	100

Tabla 4.5: Tabla de efectividad del encendido por plasma para combustible 5050, en las diferentes posiciones. Condición MT, P_{inj} = 1000 y 1500 bar.

La estructura de estas dos tablas es la misma que las de las tablas [4.2] y [4.3]. Representándose la efectividad para dos presiones de inyección, 1000 y 1500 bar. Prestando atención al caso cuyo retraso del plasma es de 400 μs a una distancia del inyector de 20 mm, se puede observar que a 1000 bar de presión de inyección, se tiene una efectividad del 50 %.

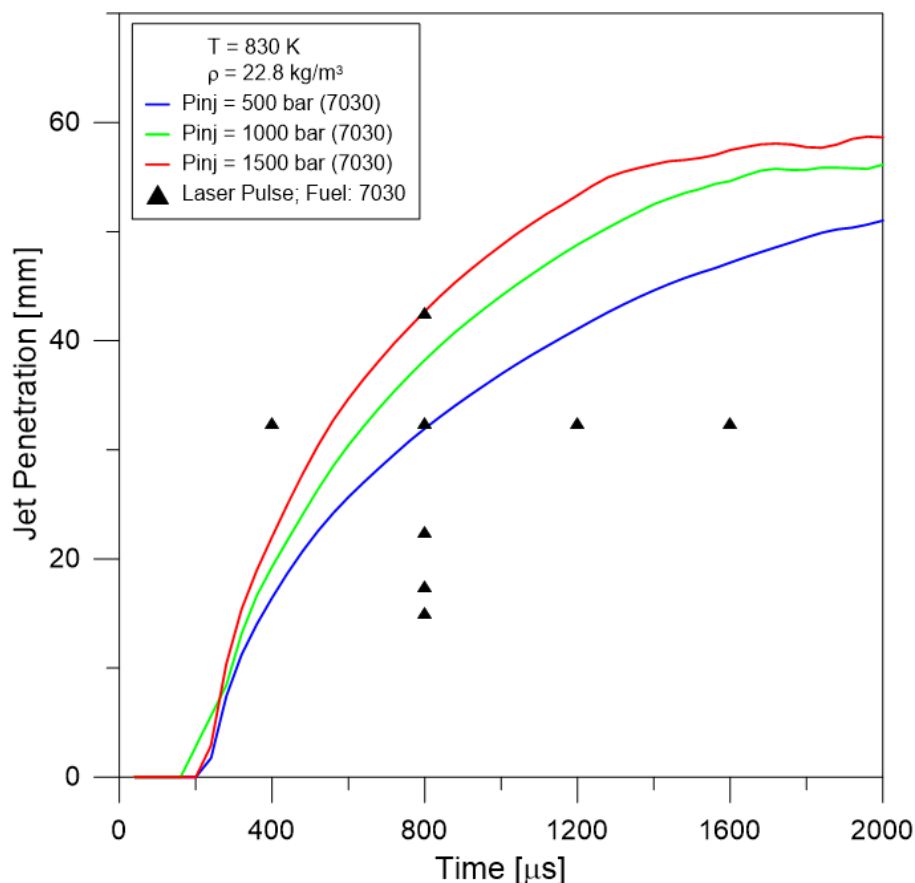


Figura 4.5: Penetración del chorro en condiciones inertes para el combustible 7030 y 5050, en condiciones termodinámicas de media temperatura (MT).

Para interpretar los resultados anteriores, es importante conocer las condiciones locales del chorro que se pretende encender tanto en el momento como en la posición en la que se dispara el plasma. Con este objetivo, la figura [4.5] muestra la penetración de un chorro de combustible 7030, para 500, 1000 y 1500 bar, en condiciones termodinámicas de media temperatura (MT) y atmósfera inerte. Estas curvas representan para cada instante la distancia de la punta del chorro con respecto al inyector. Además, en la misma gráfica se han representado los puntos correspondientes a las distintas configuraciones de plasma empleadas para el combustible.

El concepto básico que se representa en esta figura es que todo aquel punto que esté por debajo de la curva de penetración para cada presión de inyección, debería garantizar que el plasma generado esté localizado espacialmente dentro del chorro. Por ello, se puede observar como hay puntos que claramente quedan fuera (como $400\mu s$) y otros que están al límite y que podrían dar problemas para conseguir el encendido por plasma. El combustible con el que se puede ver claramente el caso de $400\mu s$, es el 5050, donde el retraso del plasma, como se describe en el capítulo [3], es demasiado corto; pudiendo coincidir en ese instante de tiempo con el chorro aún en fase líquida, debido a la menor velocidad del chorro. De este modo se puede interpretar que en el 50 % de las repeticiones de este ensayo el encendido no es provocado por el plasma, sino que es por compresión.

Uno de estos puntos que está en el límite es el correspondiente a un retraso de $800\mu s$, con una distancia de aproximadamente 42,5 mm. Este está muy cerca de la curva de

penetración del chorro inyectado a 1500 bar, y claramente por encima del resto de curvas. Sin embargo, esta configuración no es efectiva ni siquiera para la presión de inyección más elevada.

Este resultado sugiere que es posible que, bajo determinadas circunstancias, el sistema de plasma no es capaz de encender el chorro aunque el láser sea disparado dentro del mismo. De acuerdo al análisis presentado por J.V.Pastor et al. [9], un sistema de encendido semejante al utilizado en este trabajo presentaba limitaciones que estaban relacionadas con la concentración de combustible en la zona donde se generaba el plasma. Tanto si era muy alta como si era muy baja, la combustión no se iniciaba.

Para evaluar esta condición, se ha recurrido al modelo 1D descrito en el capítulo [3]. Este permite calcular la concentración del combustible a lo largo de un chorro, para unas condiciones de contorno semejantes a las experimentales.

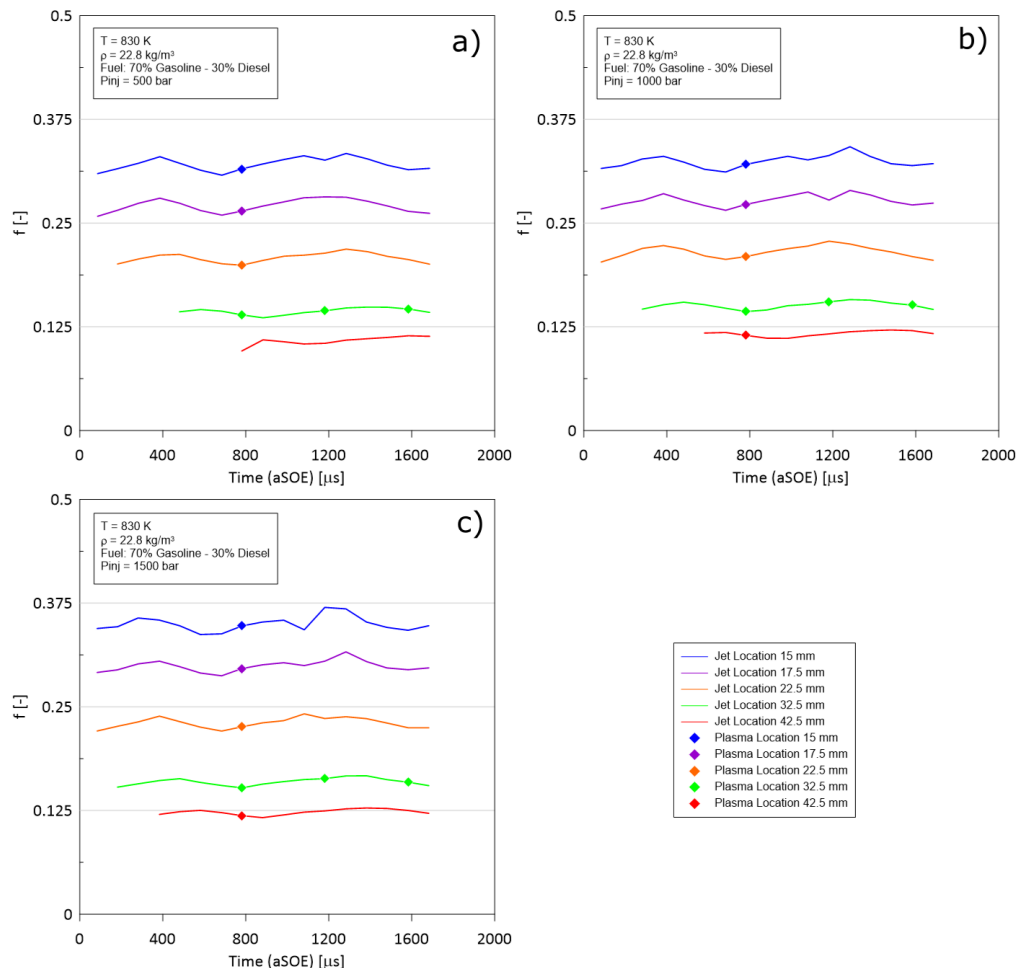


Figura 4.6: Variación de la fracción másica del combustible en el tiempo, para las diferentes posiciones a las que se ha disparado el plasma. Condiciones termodinámicas de media temperatura (MT) para el combustible 7030.

La figura [4.6] muestra la variación de la fracción másica para los diferentes puntos

de funcionamiento del sistema de encendido. Teniendo como condiciones termodinámicas MT y tres presiones de inyección que corresponden a cada gráfica, donde: a) $P_{inj} = 500$ bar, b) $P_{inj} = 1000$ bar y c) $P_{inj} = 1500$ bar.

La gráfica está estructurada de la siguiente forma: en el eje de abscisas se representa el tiempo con respecto al inicio de la inyección (aSOE) y en el eje de ordenadas se tiene la fracción másica del combustible. Las diferentes curvas de colores representan las posiciones en las que se genera el plasma, mientras que los diamantes muestran concretamente las distintas configuraciones empleadas para el plasma. Cada color corresponde a una distancia del plasma diferente.

Analizando los resultados para una distancia del plasma de 42.5 mm, se observa que en cualquiera de las tres presiones de inyección, el punto o no está representado (el chorro no ha alcanzado esa posición) o si lo está, la fracción másica correspondiente es menor que para cualquiera del resto de configuraciones de plasma.

Teniendo esto en cuenta, se puede interpretar que una fracción másica de 0.11 supone una concentración demasiado baja de combustible para que el sistema de encendido funcione. Como consecuencia de una fracción másica tan baja, la energía liberada por este al disparar el plasma parece no ser suficiente para estabilizar la combustión. Por tanto, en vista de los resultados mostrados en la figura [4.6], se puede concluir que para fracciones másicas inferiores a 0.14, el sistema de encendido por plasma no es eficaz.

Un análisis similar para la mezcla 5050 muestra que si este es disparado a 5mm o menos del inyector, no se consigue iniciar la combustión. Estos puntos representan el extremo opuesto del comentado en el párrafo anterior para la mezcla 7030. En estos puntos la concentración de combustible es tan alta (incluso se encuentra en fase líquida) que el plasma no consigue generar el encendido del chorro. Esto concuerda con los resultados mostrados por J.V.Pastor et. al [16], donde el sistema no es efectivo a una distancia por debajo de 7mm.

Una vez determinada la efectividad del sistema de encendido para las distintas configuraciones evaluadas, se puede proceder al análisis de su funcionamiento e influencia sobre la combustión. De aquí en adelante, los puntos de baja efectividad identificados anteriormente han sido excluidos.

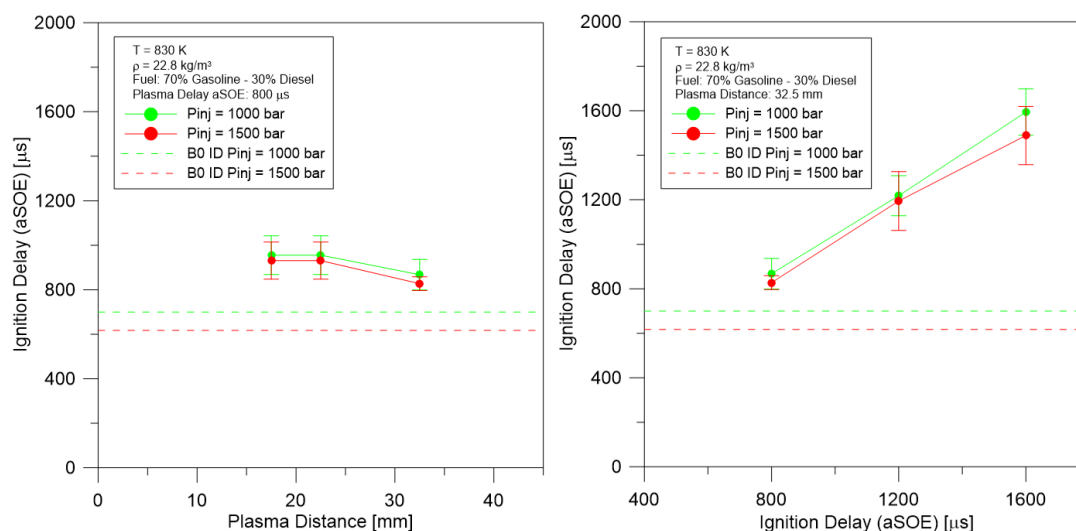


Figura 4.7: Efecto del retraso (derecha) y la posición (izquierda) del plasma sobre el ID, para el combustible 7030, en MT y una presión de inyección de 1000 y 1500 bar.

La influencia de la posición y el retraso del plasma sobre el ID se representa en la figura [4.7]. Esta está estructurada en dos partes. En la gráfica de la derecha, se relaciona el ID con el retraso del plasma. Se representa en el eje de abscisas el retraso con el que se genera el plasma a una distancia fija de 32.5 mm desde el inyector y en el eje de ordenadas se muestra el ID del combustible 7030. La curva verde corresponde a 1000 bar de presión de inyección, y la curva roja a 1500 bar. Las líneas discontinuas representan el ID del B0, como referencia. Las condiciones termodinámicas de funcionamiento del motor son las correspondientes al punto MT. En la gráfica de la izquierda, por otro lado, el eje de abscisas representa la distancia a la que se genera plasma con respecto al inyector y el eje de ordenadas el ID del combustible 7030. El código de colores empleado es el mismo que para la gráfica de la derecha.

Lo primero que se aprecia observando la gráfica de la derecha de la figura [4.7] es como el retraso del plasma afecta directamente al retraso del encendido de la llama. Parece que las presiones de inyección no afectan a la pendiente de ambas curvas. En comparación con B0, se podría decir que la condición mas parecida en ID es la correspondiente a un retraso del plasma a 800 μs .

En cuanto a la gráfica de la izquierda, se puede observar como la variación del ID con las diferentes posiciones del plasma es despreciable. A pesar de que se observan ciertas diferencias, estas son del orden de magnitud de la desviación estándar de los resultados. Además, no se aprecia una tendencia clara. Por tanto, no es posible afirmar que exista una dependencia entre ambos parámetros.

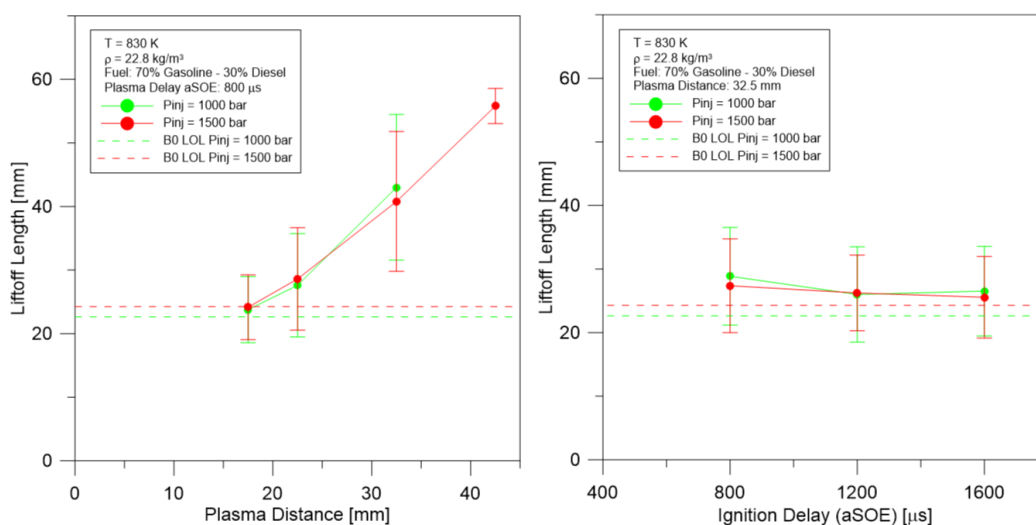


Figura 4.8: Efecto del retraso (derecha) y la posición (izquierda) del plasma sobre el LOL, para el combustible 7030, en MT y una presión de inyección de 1000 y 1500 bar.

En lo que respecta al despegue de llama, el efecto de la configuración del plasma está representado en la figura [4.8]. Empezando por la gráfica de la derecha, el retraso con el que se genera el plasma a una distancia fija de 32.5 mm desde el inyector está representado en el eje de abscisas. Mientras, el eje de ordenadas representa el despegue de llama observado para el combustible 7030. La curva verde corresponde a 1000 bar de presión de inyección, y la curva roja a 1500 bar. Las líneas discontinuas representan el LOL del B0, como referencia. Las condiciones termodinámicas de funcionamiento del motor son las correspondientes al punto MT.

Por otro lado, la gráfica de la izquierda, cuenta en el eje de abscisas con la distancia del plasma generado con respecto al inyector, y en el de ordenadas el despegue de llama observado para el combustible 7030. El código de colores empleado es el mismo que para la gráfica de la derecha. Las condiciones termodinámicas de funcionamiento del motor son las correspondientes al punto MT.

Viendo la gráfica de la derecha se ve claramente como el retraso del plasma no influye en el LOL. Al igual que se comentó anteriormente, se observa una ligera variación pero esta es menor que la magnitud de la desviación estándar de los resultados. Por tanto, no puede afirmarse que exista una dependencia clara entre estos dos parámetros.

Respecto a la gráfica de la izquierda, sí se puede ver como hay variación del LOL relacionado con las diferentes posiciones del plasma. Esto se debe a que se energiza el chorro a una distancia más lejana, por lo que la combustión empezará en una cota más lejana con respecto al inyector.

Al comparar los resultados con el LOL de B0, se puede apreciar que la configuración de plasma que nos da el LOL de 7030 más parecido es 17,5 mm. Así, teniendo en cuenta todo lo anterior, se puede afirmar que generando el plasma con 800 μs de retraso a 17,5mm del inyector se obtiene un ID y LOL semejantes a los del B0 en las mismas condiciones. Por tanto, esta es la configuración que se ha escogido para comparar el proceso de combustión

en el capítulo siguiente. Esto supondría en un motor convencional fijar el mismo tiempo de retraso de encendido para ambos combustibles. Esto es importante ya que, como se ha visto en secciones anteriores, un retraso excesivo puede conducir a una combustión defectuosa además de limitar el régimen de giro máximo del motor.

Se ha realizado el mismo estudio en las condiciones termodinámicas de baja temperatura (LT) y nominal (NO). Sin embargo, en estos casos no se ha encontrado una configuración de plasma que permita obtener simultáneamente el mismo ID y LOL que B0 en tales puntos de funcionamiento. Por ello, se va a mostrar para estas dos condiciones únicamente aquellos puntos que son comparables en base a uno u otro parámetro.

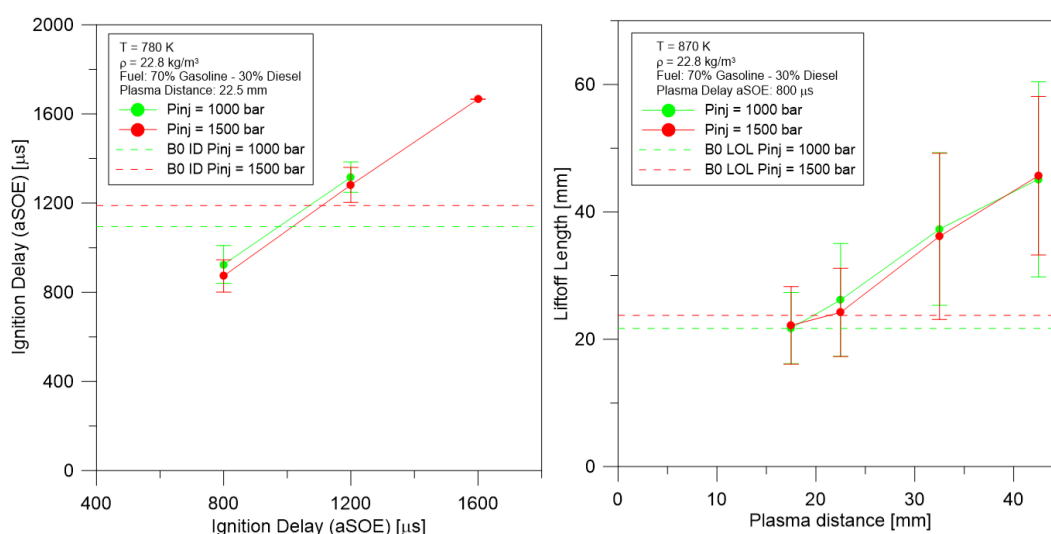


Figura 4.9: Efecto de la variación del retraso de plasma sobre ID para LT (izquierda). Efecto de variación de la posición de plasma sobre LOL para NO (derecha). Ambas gráficas para las presiones de inyección de 1000 y 1500 bar para el combustible 7030.

En la figura [4.9], empezando por la gráfica de la izquierda, como eje de abscisas se tiene el retraso del plasma y en el de ordenadas se tiene el ID correspondiente a el combustible 7030 para dos presiones de inyección, 1000 y 1500 bar, para la condición de baja temperatura (LT). La curva verde corresponde a 1000 bar de presión de inyección, y la curva roja a 1500 bar. Las líneas discontinuas representan el ID del B0, como referencia. En la gráfica de la derecha, se muestra para el eje de abscisas la distancia a la que se genera el plasma y en el de ordenadas el LOL del combustible 7030 para una condición termodinámica nominal (NO). La curva verde corresponde a 1000 bar de presión de inyección, y la curva roja a 1500 bar. Las líneas discontinuas representan el LOL del B0, como referencia.

En la grafica de la izquierda, la configuración que mejor se adapta a B0 en cuanto a retraso de encendido corresponde a un retraso de 1200 μs y una distancia del plasma de 22.5 mm, tanto para 1000 y 1500 bares de presión de inyección. Aunque si se siguen la tendencias de las curvas, el retraso ideal sería de aproximadamente de 1000 μs . Para esta configuración, el B0 presenta un LOL de 22.2 mm mientras que el 7030 es de 30 mm. Para el retraso considerado no se realizó un barrido de posiciones de plasma, por lo que

no se dispone un punto más similar en este aspecto.

En cuanto a la gráfica de la derecha, donde se muestra la condición NO, se ve como hay un punto de funcionamiento del sistema de encendido en el que 7030 se asemeja mucho al de B0 en lo que respecta a LOL. Si se genera el plasma a una distancia de 17.5 mm con respecto al inyector, se obtiene un despegue de llama para el combustible 7030 semejante al diésel. Sin embargo, al tratarse de la condición más reactiva, el B0 presenta un ID de 511 μs lo que exige un tiempo de disparo cercano a los 400 μs (dónde se ha mostrado que el sistema no puede operar correctamente).

Se ha hecho el mismo estudio de ID y LOL para el combustible 5050, dando como resultado un comportamiento similar al del combustible 7030.

Para unas condiciones de funcionamiento del motor de media temperatura (MT), así como para las nominales (NO), el punto de funcionamiento del sistema de encendido que más se asemeja al del B0 tanto en ID como en LOL es un retraso del plasma de 400 μs y una distancia del plasma de 20 mm. Es importante recordar que para este combustible las posiciones de plasma se modificaron por ser más reactivo. Es por esto que, a diferencia del combustible 7030, en este caso un retraso tan corto sí es efectivo para el encendido del chorro.

Para unas condiciones de funcionamiento del motor de baja temperatura (LT) para el combustible 5050, el punto de funcionamiento del sistema de encendido que más se asemeja al del B0 tanto en ID como en LOL es un retraso del plasma de 1200 μs y una distancia del plasma de 20 mm.

Los puntos de funcionamiento para el combustible 5050 y el 7030, los cuales son semejantes al auto-encendido de B0, son los descritos anteriormente en esta sección. Estos puntos se muestran en la tabla [4.6].

	5050		7030	
	Plasma distance [mm]	Plasma delay [μs]	Plasma distance [mm]	Plasma delay [μs]
LT	20	1200	22.5	1200
MT	20	400	17.5	800
NO	20	400	17.5	800

Tabla 4.6: Tabla de los puntos de funcionamiento semejantes al combustible B0 (Auto-encendido), para las diferentes condiciones termodinámicas de funcionamiento del motor (LT, MT, NO) con una presión de inyección de 1000 bar para los combustibles 5050 y 7030.

Conociendo los puntos de funcionamiento del sistema de encendido por plasma semejantes a B0 para cada combustible estudiado, se muestran los valores de LOL y ID para cada combustible en el punto de funcionamiento descrito anteriormente en la tabla [4.6]. Todas las correspondencias encontradas entre el B0 y el sistema de encendido por plasma para las dos mezclas se resumen en la siguiente tabla:

	B0		5050		7030	
	LOL [mm]	ID [μs]	LOL [mm]	ID [μs]	LOL [mm]	ID [μs]
LT	29.7	1261	23.6	1224	29.23	1316
MT	22.64	866.6	25.53	616.6	23.77	955.55
NO	21.72	644.38	22.65	518.45	21.74	885

Tabla 4.7: Tabla de correspondencias de los combustibles estudiados en sus puntos de funcionamiento semejantes al combustible B0 (Auto-encendido), para las diferentes condiciones termodinámicas de funcionamiento del motor (LT, MT, NO) con una presión de inyección de 1000 bar.

La tabla [4.7] muestra las correspondencias de el combustible 5050 y 7030 con el B0 para las tres condiciones de funcionamiento del motor estudiadas anteriormente. Se observa una tendencia a la disminución del Lift-off Length cuando mayor es la temperatura en la cámara de combustión, así como también la disminución del Ignition Delay.

Capítulo 5

Características de la combustión asistida por plasma

5.1 Introducción

El objetivo de este capítulo es mostrar como queman las diferentes mezclas asistidas por plasma comparándolas con el combustible de referencia B0, así como analizar la tendencia de formación de hollín. Esta parte del trabajo se centra en los puntos de funcionamiento del sistema de encendido por plasma que se han identificado al final del capítulo anterior.

5.2 Formación de Hollín

En esta sección, se analizarán las características de la llama observada, así como la radiación que esta emite. También se hará un inciso sobre el retraso con el que tarda en quemar. Para evaluar el comportamiento de los diferentes combustibles considerados en este estudio, se tomará como referencia el punto de operación MT a 1000 bar de presión de inyección. De acuerdo a la tabla (4.7), esto corresponde a un un retraso de generación de plasma 800 μs y una distancia al inyector de 17.5 mm para el combustible 7030. Por otro lado, para el combustible 5050 se ha seleccionado un retraso de 400 μs y 20 mm de distancia.

Primero se discuten los aspectos más básicos, usando los datos de luminosidad natural (NL). Para ello, se presenta a continuación la figura [5.1]. Dicha figura muestra el encendido provocado de los combustibles 7030 y 5050 y el auto-encendido del B0. El eje de abscisas define el tiempo de la secuencia en micro-segundos. En vertical se organizan los diferentes combustibles estudiados en orden descendente en contenido de diésel.

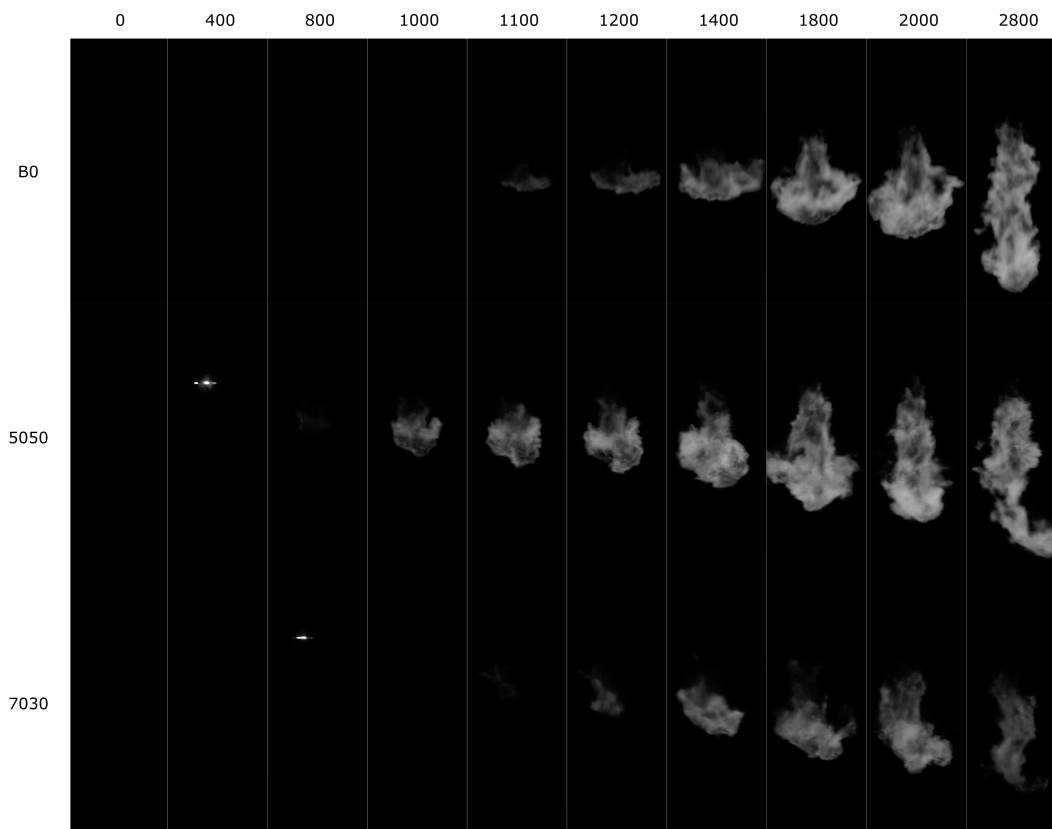


Figura 5.1: Secuencia de luminosidad natural correspondiente a los tres combustibles, $P_{inj} = 1000$ bar y condiciones de funcionamiento del motor de media temperatura(MT).

Aclarar que con el método de luminosidad natural no se puede distinguir en la radiación emitida que es hollín y que es por temperatura. Esto condiciona que para detectar el hollín se use el método DBI, explicado en el capítulo [3] para el cálculo del factor KL el cual se incluirá en el análisis en la siguiente sección.

La principal idea de analizar con la luminosidad natural, es la de poder ver cuanta radiación es emitida durante la combustión. También se puede diferencia mejor con este método la longitud y el despegue de la llama.

La tendencia principal que se observa es que, cuando menor es la cantidad de diésel en la mezcla menor luminosidad, por lo que se entiende que hay menor radiación emitida. Sin embargo, se observa una longitud de llama así como el despegue de la misma similar entre todos los combustibles, que se debe a que los puntos de funcionamiento del sistema de encendido para cada mezcla son diferentes para asemejarse al auto-encendido del B0, como ya se ha mencionado anteriormente. Otro aspecto a destacar es que con el plasma se han conseguido tiempos de retraso de encendido semejantes, habiendo como mayor diferencia unos $200\mu s$ entre el combustible 5050 y 7030.

A partir de las imágenes de luminosidad natural como las que se han mostrado previamente, se pueden obtener mapas que permiten observar la evolución espacial y temporal de la llama. Estos mapas se presentan en las figuras [5.2] y [5.3]. Cada uno de ellos

muestra, en el eje de ordenadas, la evolución de intensidad acumulada en dirección perpendicular al eje de la llama en función de la distancia con respecto al inyector. En el eje de abscisas, por otro lado, se muestra la evolución temporal de dicha intensidad. Cada mapa es el resultado de promediar las 30 repeticiones de cada ensayo. Cada fila representa un combustible, mientras que las columnas corresponden con las diferentes condiciones de funcionamiento del motor, siendo estas LT, MT y NO. La figura [5.2] representa los ensayos realizados a 1000 bar de presión de inyección y la figura [5.3] los realizados a 1500 bar de presión de inyección.

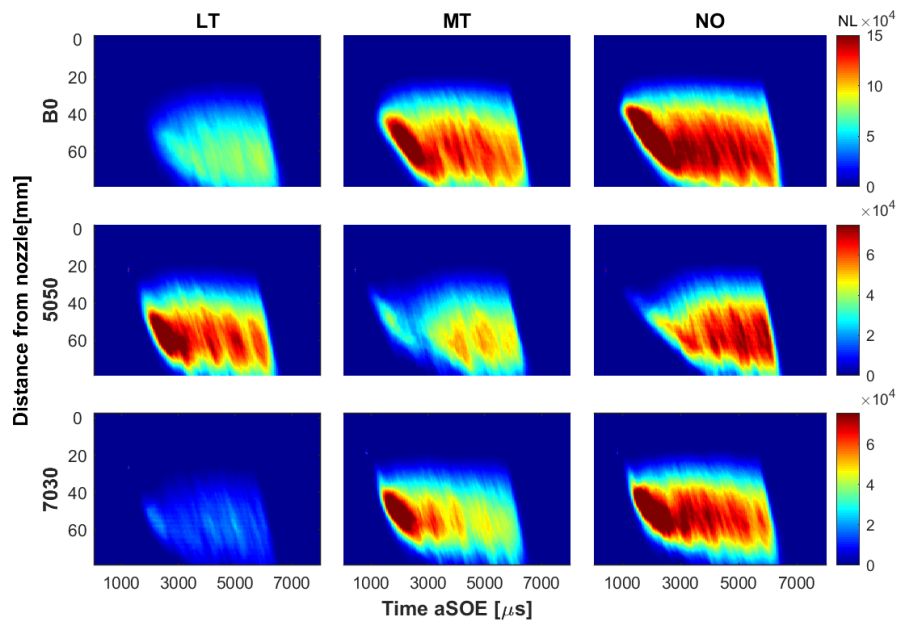


Figura 5.2: Mapa de intensidad lumínica para los tres combustibles. Condiciones de funcionamiento del motor LT, MT y NO, $P_{inj} = 1000$ bar.

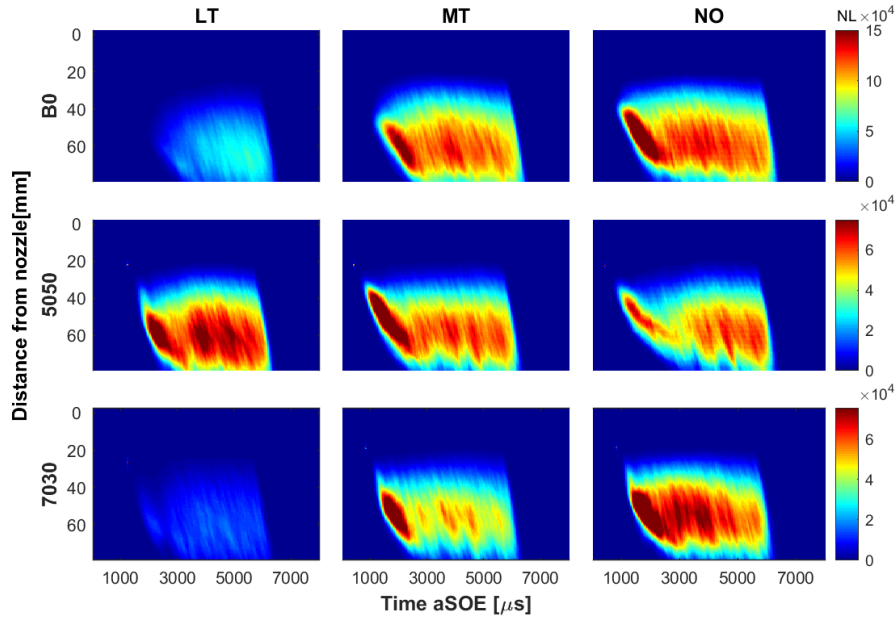


Figura 5.3: Mapa de intensidad lumínica para los tres combustibles. Condiciones de funcionamiento del motor LT, MT y NO, $P_{inj} = 1500$ bar.

Empezando por la figura [5.2], considérese como referencia el diésel (B0) en auto-encendido. Se puede ver como a mayor temperatura de funcionamiento del sistema se obtiene una mayor luminosidad en la combustión. Esto, está directamente relacionado con las condiciones en las que auto-enciende el combustible. Conforme aumenta la temperatura de la cámara de combustión, tanto el retraso de encendido como la distancia de despegue de la llama disminuyen. De acuerdo con C.Micó [4], esto se debe a que el chorro de combustible ha tenido menos tiempo para mezclarse con el aire y, por tanto, se dan unas condiciones más propicias para la formación de hollín.

Esto mismo se observa para el combustible 7030. En este caso, la configuración del sistema de encendido por plasma fuerza una variación de ID y LOL semejantes, repercutiendo de la misma manera en la formación de hollín.

Por el contrario, dicha tendencia no se muestra en el combustible 5050. En este caso, se aprecia como para la condición intermedia la intensidad de la llama es menor que para las otras dos. Esto es debido a la configuración del sistema de plasma escogido y su efectividad en estos puntos de funcionamiento.

Como se ha visto en el capítulo [4], un retraso de $400 \mu s$ en ocasiones es demasiado corto para encender el chorro de la mezcla 5050. Cuando esto sucede, tiene lugar un auto-encendido que ocurre considerablemente más tarde y más lejos del inyector. Esto, genera un efecto sobre la formación de hollín totalmente contrario al de la temperatura en cámara. Así, al promediar ciclos de encendido provocado con otros de auto-encendido, el resultado es un nivel de radiación menor que el que se obtendría si solo se considerasen los primeros.

De la figura [5.2] también se puede extraer una clara tendencia relacionada con la composición del combustible. Las mezclas de diésel y gasolina presentan una gran diferencia en radiación con respecto al B0, como queda patente en las diferentes escalas que se han empleado para representar los resultados. Dado que se ha intentado que el sistema de encendido copie el comportamiento del diésel puro, estas diferencias entre combustibles se pueden desvincular de un tiempo de retraso o un despegue de llama diferente que causaría la gasolina. Sin embargo, se puede ver que las diferencias entre 5050 y 7030 no son tan evidentes. En este caso, la propia configuración del sistema de encendido podría ser la causante, dado que no se han conseguido igualar para ambas mezclas la longitud de despegue de llama (Tabla 4.7).

Si se observa la figura [5.3], se pueden deducir que existen las mismas tendencias que en la figura [5.2]. No obstante, si se compara el combustible 5050 de esta figura con la de la anterior en las condiciones de MT y NO, se ve como la tendencia se invierte. Dando como resultado una mayor luminosidad a menor temperatura (MT) que a alta temperatura (NO). Al igual que en el caso anterior, esto se ha relacionado con una efectividad del encendido del sistema de plasma menor al 100%, que genera una disminución de la luminosidad promedio al calcularla para combinaciones de combustiones de encendido forzado y de auto-encendido.

Hasta ahora, con los mapas que se han mostrado de luminosidad, no es posible determinar que parte de la radiación que se muestra es debido a la cantidad de hollín y cual es debido a la temperatura que éste alcanza [4]. Así, el análisis presentado hasta este punto ha de ser interpretado con mucho cuidado.

Por este motivo, para poder determinar el hollín que se forma en la combustión de forma cuantitativa, es necesario el uso de una técnica de medida alternativa. En este caso se ha aplicado la medida de extinción de luz, también llamada LEI. Con esta técnica se puede determinar la cantidad de hollín, como ya se ha mencionado y se describe en el capítulo [3]. Tal como se indica en dicho capítulo, ésta es representada por el factor KL. A continuación se muestra una secuencia como la de luminosidad natural (NL) de la figura [5.4].

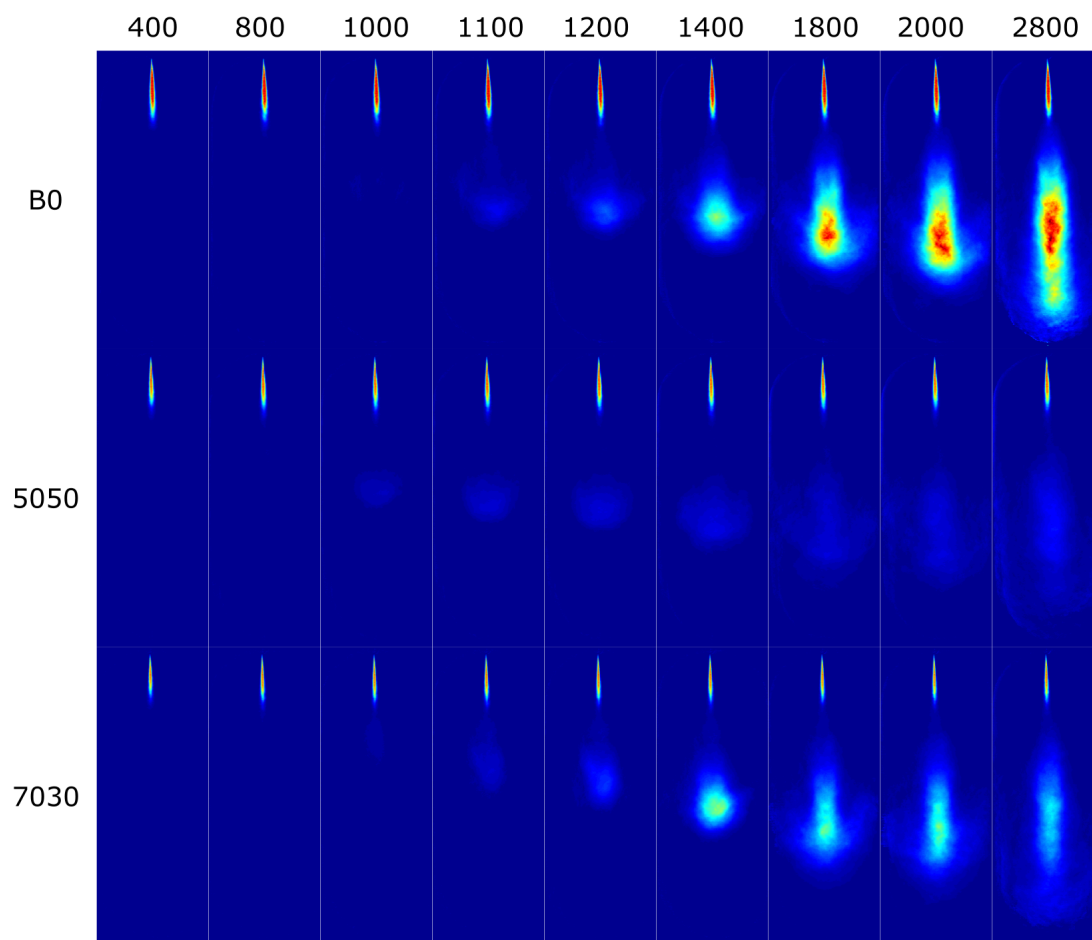


Figura 5.4: Secuencia de luminosidad por extinción de luz correspondiente a los tres combustibles, $P_{inj} = 1000$ bar y condiciones de funcionamiento del motor de media temperatura(MT). Las imágenes son el resultado de promediar las 30 repeticiones.

La estructura de la figura [5.4] es la misma que la de la figura [5.1]. Considerando como referencia el diésel (B0) con auto-encendido, si comparamos con el resto de combustibles, se puede ver que la concentración de hollín tiene una tendencia a disminuir cuando mayor es la proporción de gasolina. Como ya se ha mencionado en luminosidad natural, comentar la excepción con el combustible 5050, para la cual se muestra una menor formación de hollín que incluso para el 7030. Esto concuerda con lo observado para la NL y es debido a la baja efectividad del sistema de encendido de plasma para ese combustible y el punto de funcionamiento seleccionado. Esto da como resultado la disminución de la cantidad de KL promedio de las 30 repeticiones.

A partir de las imágenes de KL como las que se han mostrado previamente, se pueden obtener otros mapas que permiten observar la evolución espacial y temporal de la llama de forma simultánea. En la figura [5.5] y [5.6] se muestran estos mapas, para 1000 y 1500 bar de presión de inyección respectivamente. Cada uno de ellos muestra, en el eje de ordenadas, la evolución de KL promediado en dirección perpendicular al eje de la llama en función de la distancia con respecto al inyector. En el eje de abscisas, por otro lado, se muestra la evolución temporal de dicha intensidad. Para 5050 y 7030 se han representado los puntos semejantes a B0, al igual que en el resto del capítulo. Así, también se ha

añadido como referencia el combustible B0 en condiciones de auto-encendido.

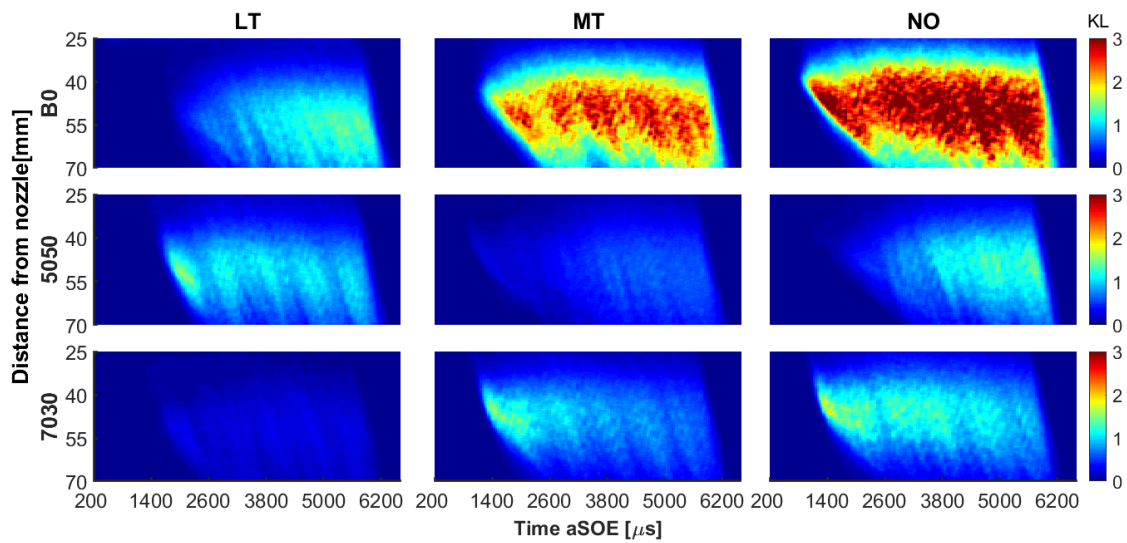


Figura 5.5: Mapas concentración de hollín, (factor KL) Condiciones de funcionamiento del motor LT, MT y NO, $P_{inj} = 1000$ bar.

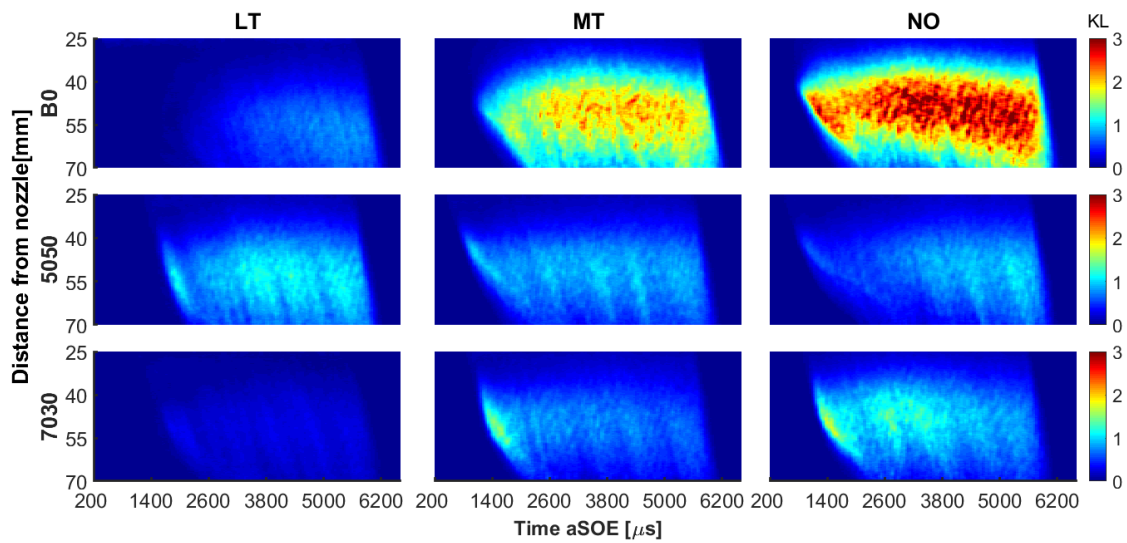


Figura 5.6: Mapas concentración de hollín, (factor KL) Condiciones de funcionamiento del motor LT, MT y NO, $P_{inj} = 1500$ bar.

Las figuras [5.5] y [5.6] están estructuradas de modo que, en columnas se tienen las diferentes condiciones termodinámicas (LT, MT, NO) y en filas se tienen los diferentes combustibles (B0, 5050, 7030). En el eje de abscisas de cada mapa se muestra el tiempo aSOE y en el eje de ordenadas se tiene la distancia respecto al inyector.

En ambas figuras se puede observar una tendencia general hacia mayor formación de hollín cuanto mayor es la temperatura en la cámara de combustión, como sugerían las medidas de luminosidad natural. Además, la extinción de luz también muestra las

anomalías mencionadas previamente para el combustible 5050, tanto a 1000 como a 1500 bar de presión de inyección. Comparando ambas figuras, también es posible ver que una mayor presión de inyección genera una ligera disminución en la formación de hollín. Esto se puede ver fácilmente en el combustible B0 y también en el 5050 (aunque de forma más débil). Esto se debe a que una mayor presión de inyección favorece el proceso de mezcla gracias a que el combustible entra en el cilindro con mayor cantidad de movimiento, arrastrando más aire hacia el interior del chorro [8].

La otra tendencia que se puede observar en las figuras [5.5] y [5.6] es la disminución de formación de hollín conforme aumenta la concentración de gasolina en la mezcla, tanto para el combustible 7030 como para el 5050. Esto confirma lo sugerido por las medidas de luminosidad natural.

Dhrubajyoti D. Das et al. [17], afirma que la tendencia a la formación de hollín de un combustible está relacionada con el contenido de moléculas con mayor cantidad de carbono, entre otras causas. De este modo, teniendo en cuenta que la gasolina está compuesta por moléculas de hidrocarburos más pequeñas que el diésel, se podría afirmar que una mayor concentración de gasolina en la mezcla reduciría el número de carbonos del combustible y, por tanto, se obtendría una mezcla con menos tendencia a formar hollín que el diésel puro.

5.3 Desarrollo de la combustión

La reducción de la formación de hollín en los combustibles 5050 y 7030 frente al diésel (B0) es del orden de un 50%, lo cual es muy positivo. No obstante, una mayor cantidad de gasolina en la mezcla también puede genera ciertos inconvenientes.

Para analizar la viabilidad de combinar el sistema de encendido por plasma con combustibles de baja reactividad como el 5050 o el 7030, no es suficiente con limitarse a estudiar la formación de contaminantes. También es necesario plantear el problema desde el punto de vista de su utilidad. Para ello, en este apartado se recurre al análisis de la señal de presión dentro del cilindro y de la liberación de calor, como ya se se hizo previamente en el capítulo [4].

Como punto de partida, se presenta la evolución de la presión en el cilindro en la fase de combustión, para los tres combustibles y las condiciones termodinámicas consideradas en este trabajo. Cada combustible es representado en su punto de funcionamiento semejante a B0 como ya se viene haciendo a lo largo de este capítulo. A continuación, en la figura [5.7] y [5.8] se muestra dicha señal, para una presión de inyección de 1000 y 1500 bar respectivamente.

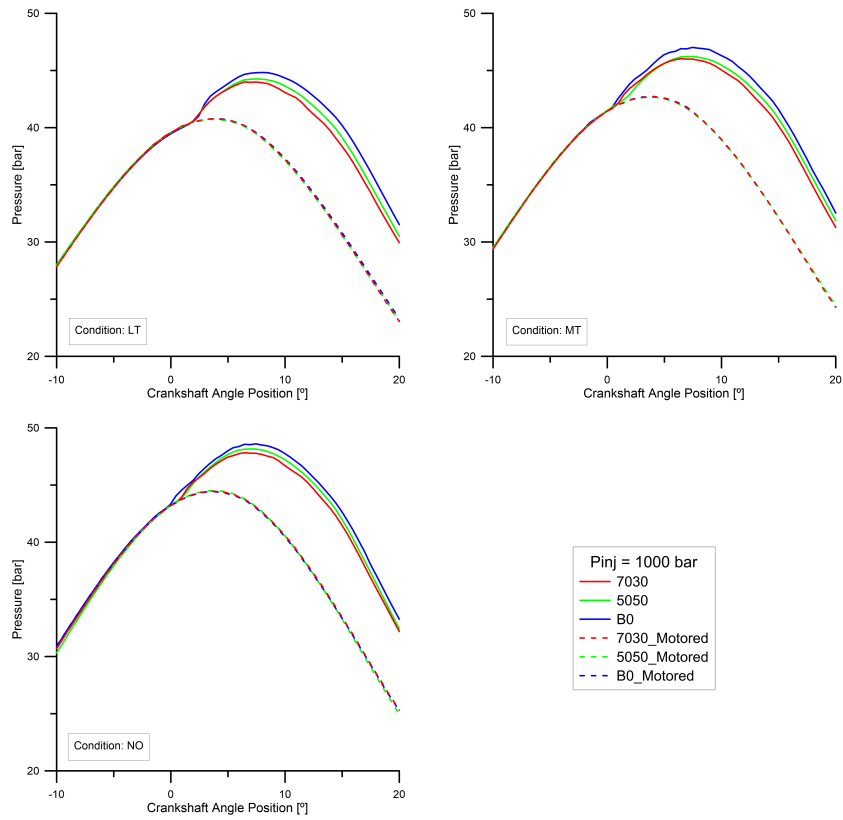


Figura 5.7: Curvas de presión en el cilindro con una presión de inyección de 1000 bar.

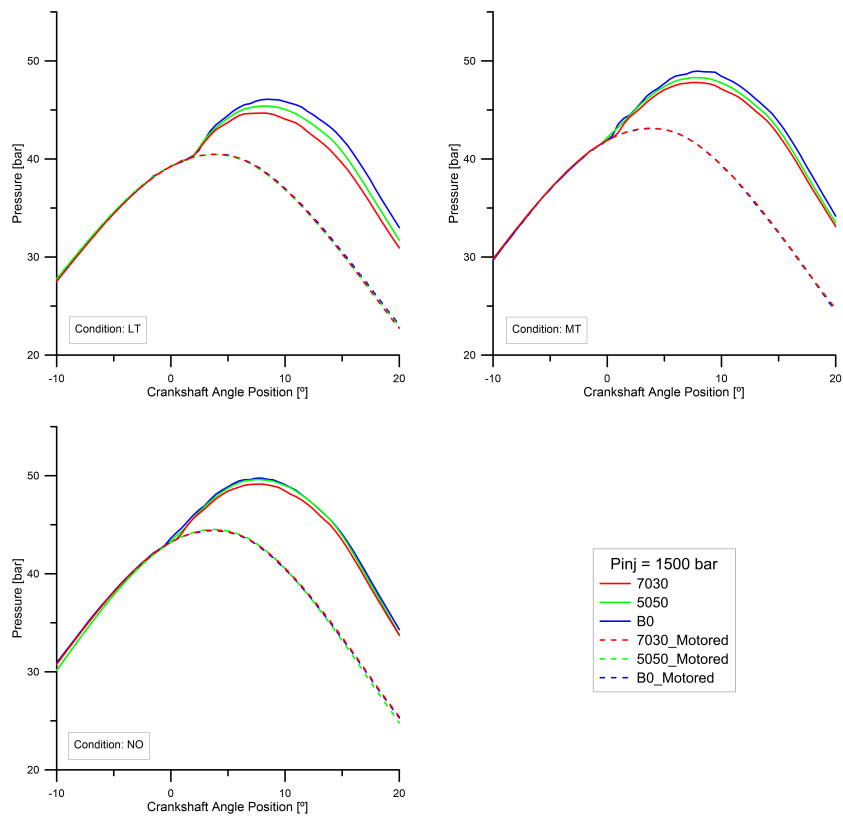


Figura 5.8: Curvas de presión en el cilindro con una presión de inyección de 1500 bar.

Para las dos figuras anteriores en el eje de abscisas se representa el ángulo de giro del cigüeñal alrededor del punto muerto superior, donde ocurre la combustión. En el eje de ordenadas se tiene la presión en el cilindro. Ambas figuras muestran la evolución de la presión en la fase de combustión para los tres combustibles estudiados (línea continua), así como para un ciclo sin inyección (línea discontinua).

Dado que lo que se busca con los puntos escogidos para el sistema de encendido por plasma es tener una combustión lo mas parecida posible al diésel, se puede observar en ambas figuras como para cualquier condición de operación se ha conseguido un retraso de encendido similar. No obstante, en cuanto a la presión máxima alcanzada en el cilindro, sí se aprecian diferencias. También se observa en ambas figuras que para la mezcla de mayor porcentaje de gasolina (7030), conforme aumenta la temperatura en cámara, la curva de presión se asemeja más a la del diésel (B0).

Para comprobar cómo las diferencias que se observan en presiones afectan al desarrollo del ciclo termodinámico, se recurre al cálculo de la liberación de calor. Esta se representa en las figuras [5.9] y [5.10].

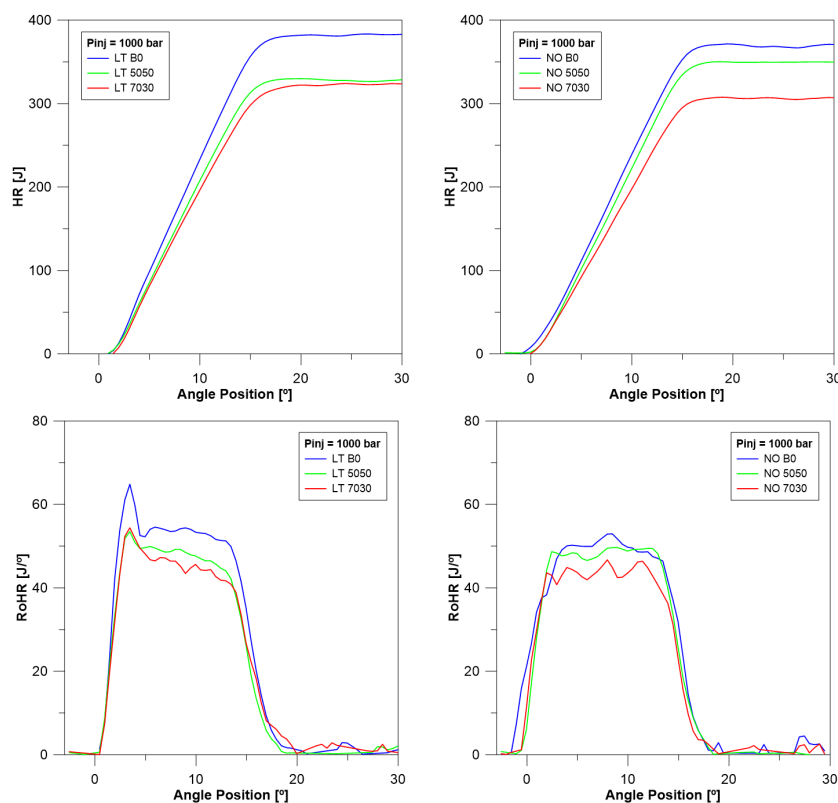


Figura 5.9: Curvas de liberación de calor y ratio de liberación de calor con una presión de inyección de 1000 bar y condiciones termodinámicas LT y NO.

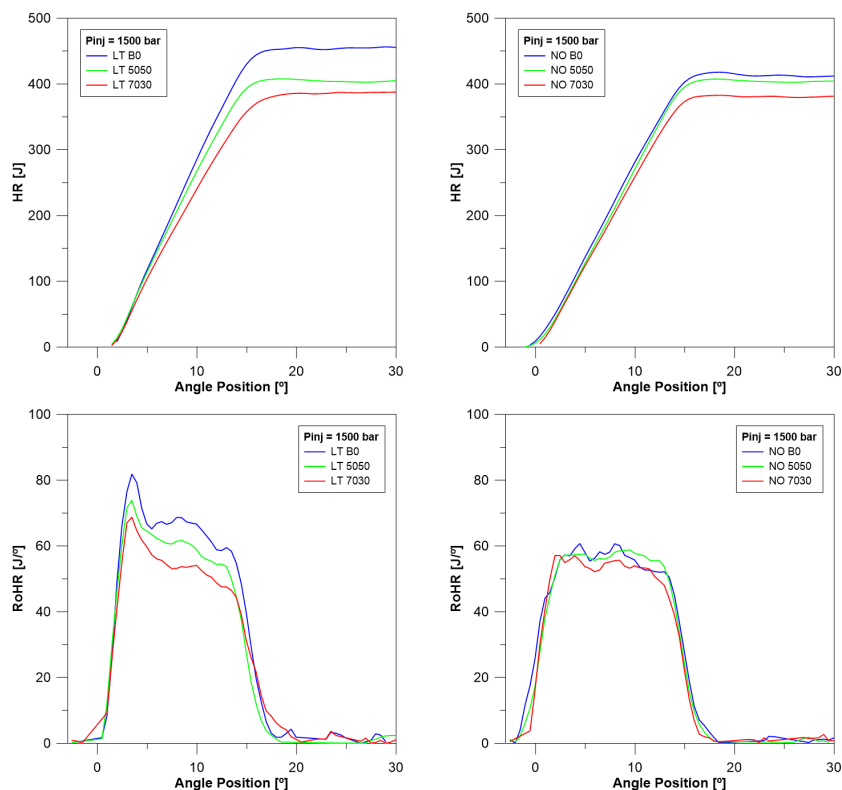


Figura 5.10: Curvas de liberación de calor y ratio de liberación de calor con una presión de inyección de 1500 bar y condiciones termodinámicas LT y NO.

Las dos figuras anteriores se estructuran de modo que en el eje de abscisas se tiene la posición del cigüeñal en un rango determinado alrededor del punto muerto superior. En el eje de ordenadas de cada gráfico se representa una magnitud distinta. Las gráficas de arriba muestran el calor liberado acumulado (HR) y las de abajo muestran la tasa de liberación de calor (RoHR). Las graficas de la izquierda representan una condición termodinámica de (LT) y las de la derecha (NO). Estas condiciones han sido elegidas por ser las extremas, y los resultados observados se pueden extender a MT. Para representar los diferentes combustibles se han utilizado líneas de diferentes colores. Comentar de nuevo que cada combustible se ha ensayado en su punto de funcionamiento semejante al diésel (B0).

En primer lugar, tanto en la figura [5.9] como en la [5.10] se observa que el calor liberado para la condición de menor temperatura es, en general, mayor que para los otros dos puntos de funcionamiento. El cálculo de esta magnitud depende de una predicción de las condiciones termodinámicas dentro del cilindro, que se realiza como se describe en el capítulo [3]. Se ha observado que una discrepancia de en torno a un 5% de estos cálculos con respecto a las medidas experimentales pueden llegar a mostrar un 20% de diferencias al calcular la liberación de calor. Es por ello, que el análisis de este capítulo se centra en la comparativa entre combustibles y deja de lado las diferencias entre puntos de funcionamiento.

Empezando por la figura [5.9], como se ha comentado también en el capítulo [4], a mayor cantidad de gasolina en la mezcla se tiene una menor liberación de calor. Esto puede estar relacionado con las diferentes propiedades físicas que presentan la gasolina y el

diésel. Por un lado, la menor densidad y viscosidad afectan a la cantidad de combustible inyectado. J.V.Pastor et al. [8] muestra un estudio del comportamiento hidráulico del mismo sistema de inyección y para los mismos combustibles, donde se observa que cuanto más gasolina hay en la mezcla, menor es la cantidad de combustible inyectado. Por otro lado, la diferencia de poder calorífico entre ambos combustibles también apunta que, para una misma masa de diésel y de gasolina, el primero presenta más energía disponible que el segundo. Continuando con la figura [5.10], a 1500 bar de presión de inyección, el comportamiento observado es muy semejante.

5.4 Resumen

Como conclusión, en este capítulo se pueden extraer dos ideas principales respecto al uso de un sistema de encendido por plasma para asistir la combustión de mezclas con diferentes proporciones de gasolina en lo que respecta al desarrollo de la combustión formación de hollín.

La primera observación importante que se puede hacer es que, si se consigue igualar el tiempo de retraso y el despegue de la llama con el uso del plasma, añadir gasolina reduce la formación de hollín. Esto ha quedado corroborado mediante la visualización de luminosidad natural y la medida de hollín a través de la extinción de luz.

La segunda observación importante es que, si bien el sistema de encendido por plasma consigue una combustión semejante entre el diésel puro y las mezclas, no es posible obtener la misma energía durante la combustión debido a las diferentes propiedades físicas de ambos combustibles. Estas afectan, por un lado, el funcionamiento del sistema de inyección. Por otro lado, el menor poder calorífico de la gasolina también limita la energía disponible. Sin embargo, ambas “desventajas” podrían compensarse mediante el uso de inyecciones ligeramente más largas.

Por último hay que puntualizar que, aunque se ha conseguido obtener ciertos puntos de funcionamiento semejantes al diésel, existen condiciones críticas donde el funcionamiento del sistema por plasma no es eficiente, lo que limita su aplicación.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1 Conclusiones

A lo largo del desarrollo de este proyecto, se ha pretendido cumplir los dos principales objetivos establecidos en el capítulo [1]. Recordando éstos, uno era determinar la viabilidad de emplear un sistema de encendido por plasma para asistir la combustión con diferentes mezclas de combustibles poco reactivos. El segundo era estudiar el comportamiento de la combustión de dichas mezclas y la formación de contaminantes, concretamente el hollín.

Para completar dichos objetivos, el trabajo se ha desarrollado en una instalación experimental (motor maqueta) con cuatro accesos ópticos a la cámara de combustión. Esto, ha permitido emplear diferentes técnicas ópticas para la visualización de la llama y el hollín, y así obtener los parámetros más relevantes que definen el comportamiento a estudiar. A modo de resumen, estas tres técnicas empleadas y su finalidad han sido:

- Quimioluminiscencia del OH: esta técnica ha sido empleada principalmente para determinar la longitud del despegue de la llama (LOL).
- Luminosidad natural (NL): empleada para determinar de forma cualitativa el comportamiento de la combustión, por ejemplo, la longitud de la llama.
- Extinción de luz (LEI): empleada para obtener de forma cuantitativa la formación de hollín durante la combustión.

En este proyecto se estudiaron tres mezclas de diésel y gasolina diferentes, para así poder observar que tendencia que se observa tanto en comportamiento de la combustión como en la formación de hollín. Todos los ensayos para este proyecto han sido realizados bajo unas condiciones termodinámicas, unas presiones de inyección representativas de las condiciones de operación de un motor de encendido por compresión comercial.

Los resultados de este estudio se exponen en los capítulos [4] y [5]. De ellos, se pueden extraer las conclusiones que se muestran a continuación:

- Se ha determinado que el uso del sistema de encendido asistido por plasma para encender mezclas poco reactivas es viable. No obstante, se han detectado configuraciones (alta concentración de combustible) donde el sistema de encendido pierde efectividad.
- Se ha demostrado el sistema de encendido asistido por plasma permite, para mezclas poco reactivas (alto contenido en gasolina), conseguir retrasos de encendido y

longitud de despegue de llama semejantes a los del diésel en un motor de encendido por compresión.

- Se ha podido verificar que las mezclas, cuanto mayor proporción de gasolina contienen menos hollín forman. Al emplear un sistema de encendido por láser, este “fuerza” el retraso de encendido y el despegue de llama de cada mezcla para que sea semejante al del diésel. Por tanto, se puede afirmar que el proceso de englobamiento de aire previo a la combustión va a ser igual y, por tanto, no debería influir en la formación de hollín. Así, se puede concluir que las diferencias observadas están relacionadas con otras propiedades de los combustibles empelados, como el contenido equivalente de carbono.
- A pesar de que el sistema de encendido permita iniciar la combustión de la misma forma que lo haría el diésel puro, se ha observado que la energía liberada en la combustión no es la misma. La densidad de cada mezcla y su poder calorífico inferior parecen justificar estas diferencias.

6.2 Trabajos futuros

El trabajo se ha desarrollado en una instalación experimental, que, si bien permitía alcanzar condiciones de operación semejantes a las de un motor comercial, presentaba también algunas diferencias importantes. Por ello, se plantea como trabajo futuro la realización de un estudio similar, en un motor transparente, con una cámara de combustión de geometría real y un inyector multiorificio. Se considera que esto permite acercarse más a una aplicación real, con muchas más fuentes de interferencia. Esto finalmente, permitiría validar el sistema de encendido para su aplicación real.

El sistema de encendido por láser ha sido diseñado para su validación en laboratorio. Esto implica que se ha usado un montaje experimental que es imposible de exportar a una aplicación comercial. Teniendo en cuenta las ventajas que se han observado en este TFG, se considera interesante plantear el desarrollo de un futuro prototipo enfocándose en su aplicación comercial.

Bibliografía

- [1] María Luisa Soria García-ramos. “Evolución de la reglamentación europea sobre emisiones y homologación de los vehículos Índice :” in: (2017).
- [2] Patrick F Flynn, Russell P Durrett, Gary L Hunter, Axel O Loye, John E. Dec, and Charles K Westbrook. “Diesel Combustion: An Integrated View Combining Laser Diagnostics , Chemical Kinetics , and Empirical Validation”. In: *SAE Technical Paper 1999-01-0509* (1999).
- [3] D E Valencia. “Caracterización de los Procesos de Inyección Combustión Diesel Mediante Visualización y Procesado Digital de Imágenes”. In: ().
- [4] Carlos Micó Reche. “DEVELOPMENT OF MEASUREMENT AND VISUALIZATION TECHNIQUES FOR CHARACTERIZATION OF MIXING AND COMBUSTION PROCESSES WITH SURROGATE FUELS”. PhD thesis. Valencia (Spain): Universitat Politècnica de València, 2015. DOI: 10.4995/Thesis/10251/58991. URL: <https://riunet.upv.es/handle/10251/58991>.
- [5] C Monin. “Caracterización del proceso de formación de hollín en una llama de difusión diesel de baja temperatura.” In: (2009), pp. 27–32. URL: <http://dspace.cc.upv.es/handle/10251/6161>.
- [6] Jesús Benajes, Santiago Molina, Antonio García, Javier Monsalve-Serrano, and Russell Durrett. “Performance and engine-out emissions evaluation of the double injection strategy applied to the gasoline partially premixed compression ignition spark assisted combustion concept”. In: *Applied Energy* 134 (2014), pp. 90–101. ISSN: 03062619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.08.008. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261914008113>.
- [7] Wolfgang Boehner and Karsten Hummel. “Common Rail Injection System for Commercial Diesel Vehicles”. In: *SAE Technical Paper Series* (2010). DOI: 10.4271/970345.
- [8] Jose Pastor, Jose M Garcia-Oliver, Antonio Garcia, and Varun Reddy Nareddy. “Characterization of Spray Evaporation and Mixing Using Blends of Commercial Gasoline and Diesel Fuels in Engine-Like Conditions”. In: *SAE Technical Paper Series* 1 (2017). DOI: 10.4271/2017-01-0843.
- [9] José V. Pastor, José M. García-Oliver, Antonio García, and Mattia Pinotti. “Laser induced plasma methodology for ignition control in direct injection sprays”. In: *Energy Conversion and Management* 120 (2016), pp. 144–156. ISSN: 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.04.086.
- [10] Jesús Benajes, Raúl Payri, Michele Bardi, and Pedro Martí-Aldaraví. “Experimental characterization of diesel ignition and lift-off length using a single-hole ECN injector”. In: *Applied Thermal Engineering* 58.1-2 (2013), pp. 554–563. ISSN: 13594311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.04.044. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.04.044>.

- [11] J. V. Pastor, J. M. García-Oliver, J. G. Nerva, and B. Giménez. “Fuel effect on the liquid-phase penetration of an evaporating spray under transient diesel-like conditions”. In: *Fuel* 90.11 (2011), pp. 3369–3381. ISSN: 00162361. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.05.006. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.006>.
- [12] J.M. Payri, F.; Desantes. “Motores de combustión interna alternativos”. In: (2011).
- [13] José V. Pastor, J. Javier López, José M. García, and José M. Pastor. “A 1D model for the description of mixing-controlled inert diesel sprays”. In: *Fuel* 87.13-14 (2008), pp. 2871–2885. ISSN: 00162361. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.04.017.
- [14] J M Desantes, J V Pastor, and J M Pastor. “A 1D model for the description of mixing-controlled reacting diesel sprays”. In: 156 (2009), pp. 234–249. DOI: 10.1016/j.combustflame.2008.10.008.
- [15] Wei Jet Thoo, Arman Kevric, Hoon Kiat Ng, Suyin Gan, Paul Shayler, and Antonino La Rocca. “Characterisation of ignition delay period for a compression ignition engine operating on blended mixtures of diesel and gasoline”. In: *Applied Thermal Engineering* 66.1-2 (2014), pp. 55–64. ISSN: 13594311. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.01.066. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.066>.
- [16] José V. Pastor, José M. García-Oliver, Antonio García, and Mattia Pinotti. “Effect of laser induced plasma ignition timing and location on Diesel spray combustion”. In: *Energy Conversion and Management* 133 (2017), pp. 41–55. ISSN: 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2016.11.054.
- [17] Dhrubajyoti D. Das, Charles S. McEnally, Thomas A. Kwan, Julie B. Zimmerman, William J. Cannella, Charles J. Mueller, and Lisa D. Pfefferle. “Sooting tendencies of diesel fuels, jet fuels, and their surrogates in diffusion flames”. In: *Fuel* 197 (2017), pp. 445–458. ISSN: 00162361. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.01.099.

Documento II

Presupuesto

Capítulo 1

Presupuesto

El principal objetivo de la realización de un presupuesto es determinar los costes de la inversión realizada para un proyecto determinado. En las siguientes secciones se desglosa el presupuesto para tener un mayor detalle de donde se ha realizado una mayor inversión.

1.1 Equipo humano

En la siguiente tabla se muestran los costes asociados a la mano de obra empleada en el proyecto:

	Tiempo (horas)	Coste (€/horas)	Total (€)
Estudiante de grado ingeniería	600	10	6000
Investigador predoctoral	500	20	10000
Investigador postdoctoral	200	30	6000
Total			22000

Tabla 1.1: Costes asociados al equipo humano que ha intervenido en el proyecto.

1.2 Instrumental específica

Esta sección comprende el desglose de los gastos asociados a todo el equipamiento empleado para el desarrollo del proyecto, se incluyen todos los costes de las licencias de software empleadas. En este desglose se muestra la amortización de dicho equipamiento, la cual se calcula con la ecuación (1.1).

$$A = \frac{C \times h}{H} \quad (1.1)$$

Donde A es la amortización, C es el coste total anual, h es el número de horas que se ha empleado el equipamiento en el proyecto y H son las horas de uso a lo largo del año.

	Precio [€]	Vida útil [años]	Amortización anual [€]
Motor maqueta	600000	10	60000
Compresor externo	150000	10	15000
Equipo de medición Horiba	120000	10	12000
Hardware informático (PC)	800	5	160
Yokogawa (DL708E)	2500	5	500
Transductor de presión	20000	5	4000
Cámara Photron SA-5	55000	5	11000
Cámara Photron SA-X2	65000	5	13000
Cámara Andor iStar	40000	5	8000
Objetivo Zeiss	1500	5	300
Objetivo ultravioleta	10000	5	2000
Fuente de alimentación	150	5	30
Divisor de haz	200	1	200
Láser Continuum	8000	10	80000
Sistema de lentes	228.5	10	2285
Licencia Office	100	1	100
Licencia MATLAB	300	1	300
Licencia Grapher	500	1	500

Tabla 1.2: Amortización anual del equipamiento

Para poder determinar el coste total de las horas trabajadas con el equipamiento, se calculan los costes asociados para cada equipo por hora trabajada. Se considera que en un año se trabaja alrededor de 1760 horas, por lo que en la siguiente tabla se muestran los costes totales de las horas de uso de cada equipo.

	Tiempo de uso [horas]	Coste [€/hora]	Coste total anual [€]
Motor maqueta	680	34.09	23181.82
Compresor externo	680	8.52	5795.45
Equipo de medición Horiba	680	6.82	4636.36
Hardware informático (PC)	680	0.09	61.82
Yokogawa (DL708E)	680	0.28	193.18
Transductor de presión	680	2.27	1545.45
Cámara Photron SA-5	680	6.25	4250
Cámara Photron SA-X2	680	7.39	5022.73
Cámara Andor iStar	680	4.55	3090.91
Objetivo Zeiss	680	0.17	115.91
Objetivo ultravioleta	680	1.14	772.73
Fuente de alimentación	680	0.02	11.59
Divisor de haz	680	0.11	77.27
Láser Continuum	680	4.55	3090.91
Sistema de lentes	680	0.13	88.28
Licencia Office	500	0.06	28.41
Licencia MATLAB	150	0.17	25.57
Licencia Grapher	50	0.28	14.20
Total			52002.60

Tabla 1.3: Gastos anuales del equipamiento

1.3 Consumibles

En esta sección se muestran los costes asociados con el equipamiento utilizado que no se puede reutilizar, sobretodo aquel equipamiento asociado a las tareas de mantenimiento.

	Cantidad [unidades]	Coste [€/unidad]	Total anual [€]
Filtro de aire	1	15	15
Filtro de combustible	2	20	40
Papel	2	10	20
Ventana de cuarzo	3	800	2400
Juntas	9	2	18
Diésel [Litros]	50	1.13	56.5
Gasolina [Litros]	50	1.26	63
Líquido refrigerante [Litros]	600	1	600
Total			3212.5

Tabla 1.4: Resumen de costes asociados con el material consumible.

1.4 Presupuesto final

Sabiendo el desglose de los gastos que se han tenido en este proyecto, se puede hacer un calculo del coste total anual de la inversión.

Tipo de presupuesto	Coste asociado [€]
Mano de obra	22000
Equipamiento	52002.60
Consumibles	3212.5
Costes indirectos 25 %	19303.78
Total anual	96518.88

Tabla 1.5: Presupuesto total anual

El presupuesto total anual asciende a: **NOVENTA Y SEIS MIL QUINIENTOS DIECIOCHO EUROS CON OCHENTA Y OCHO CÉNTIMOS.**