

Universitat Politècnica de València
Departamento de Máquinas y Motores Térmicos



TESIS DOCTORAL

APORTACIONES AL ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN
TRANSITORIA DE LLAMAS DE DIFUSIÓN DIESEL

Realizada por: D. Francisco Briceño Sánchez
Dirigida por: Dr. D. José María García Oliver

Valencia, Noviembre 2015

TESIS DOCTORAL

APORTACIONES AL ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN
TRANSITORIA DE LLAMAS DE DIFUSIÓN DIESEL

presentada por

FRANCISCO BRICEÑO SÁNCHEZ

en el

DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES
TÉRMICOS de la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
DE VALENCIA

para la obtención del grado de

DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
DE VALENCIA

Valencia, Noviembre 2015

TESIS DOCTORAL

APORTACIONES AL ESTUDIO DE LA EVOLUCIÓN TRANSITORIA DE LLAMAS DE DIFUSIÓN DIESEL

Realizada por: D. Francisco Briceño Sánchez
Dirigida por: Dr. D. José María García Oliver

Tribunal Calificador:

Presidente:
Secretario:
Vocal:

Suplentes:

Presidente:
Secretario:
Vocal:

*A los que se han ido,
Ana, Luis y Don Tomás*

*A los que están,
Olga*

*A los que recién han llegado,
Mi hijo Luca y mi sobrino Tomás*

Agradecimientos

Es tiempo de echar la vista atrás y visualizar con cámara rápida lo que ha sido esta gran empresa. Sin duda, es un tiempo el que personalmente he podido explorarme primero como persona y luego como ingeniero para conocer mis virtudes, defectos y también mis limitaciones. De manera global, el resultado ha sido más que positivo y muy enriquecedor. Así que lo que menos puedo hacer que dedicar unas líneas a todas las instituciones y personas que me han apoyado de manera activa en llegar a la meta.

Primero, debo agradecer al Ministerio de Educación de España por financiar a través de una beca mis estudios de doctorado. En segunda instancia, debo agradecer al Departamento de Máquinas y Motores Térmicos en la persona de los profesores Francisco Payri y José María Desantes el haberme dado la oportunidad para desarrollarme profesionalmente dentro del grupo de investigación CMT-Motores Térmicos. Especialmente, quisiera agradecer a María José Lerma quien atendió mi solicitud en el momento que todo empezó con las prácticas de empresa previas a obtener mi título de ingeniero.

Muy agradecido estoy, como no puede ser de otra manera, con el Dr. José María García Oliver quien ha servido de guía como el faro en el puerto durante estos años. Alguien quien siempre tuvo su puerta abierta para escuchar mis planteamientos, dudas e inquietudes. Alguien quien puso sus conocimientos de óptica y de combustión de manera ilimitada a mi disposición. Alguien que en lo personal, en los momentos difíciles estuvo a mi lado con un gran saber estar. En definitiva, alguien con quien me ha gustado trabajar.

En lo personal, se quedarían cortas estas páginas para hacer llegar mis agradecimientos a los que han participado en este objetivo. Ha sido difícil, cierto es, son años donde me he sentido dentro de una montaña rusa, de cual ahora me bajo con esa sensación exultante pero a la vez mareante al culminar este documento. Sin saber que decir he leído acerca de algo a lo que me he aficionado, las carreras populares y maratones en las que me he evadido en épocas de desasosiego; algo que me identifica a mí y a todos vosotros. La revista Runner's World habló con el psicólogo deportivo español Lucas Rojas Marcos y le pregunto: **¿Es algo heroico correr un maratón? R:** *“Es como una prueba que uno se pone a sí mismo, que se puede conseguir pero que se sabe que va a costar mucho trabajo. Te sientes un héroe para ti mismo. Es una de las mejores pruebas que puede plantearse un ser humano, porque sabes que puedes triunfar, aunque cueste muchísimo trabajo. Las peores pruebas, las que nos frustran, son aquellas imposibles, como querer ser siempre jóvenes, querer siempre mejorar una marca.... Esa es una prueba en la que le pides a tu cuerpo más de lo que le pides*

normalmente. El cuerpo está preparado para correr como mucho 20 km. Un maratón es ponerte a tope de rendimiento y, al mismo tiempo, participar en un grupo".

Mi maratón es esta tesis doctoral, ¡y este mi grupo! Agradezco a los profesores, técnicos y estudiantes con los que he tenido la suerte de trabajar en el mundo de los motores. En especial me gustaría agradecer al Dr. José Vicente Pastor Soriano persona con la que he aprendido acerca de schlieren y quién se ha dedicado desinteresadamente a filosofar acerca de la propagación de la luz buscando soluciones para el dos colores. Al Dr. Raúl Payri, quien ha cedido una de las instalaciones experimentales usadas en esta tesis, con la dificultad logística que conllevaba. También quiero agradecer a Daniel Lérida y José Enrique del Rey que fueron los artífices de que las instalaciones experimentales funcionasen, personas que con su gran dedicación forman parte de "mi equipo". Al igual que José, quien estuvo ahí siempre en los momentos que llegaba con la pieza de "último momento" para fabricarla, te agradezco que en los momentos difíciles hayas estado ahí. Al Dr. Jean-G Nerva, quien fue mi compañero de despacho y con quién he compartido charlas sobre schlieren y otros buenos momentos. A Waldemar, Carlos, Vicent, Edu, Javi, Vicente, Borja, Mathías con quien he compartido comidas y charlas a lo largo de estos años. A Nuria quien ha contribuido con su proyecto fin de carrera en el procesado de imágenes de Dos colores Debo también agradecer al conjunto del personal administrativo del departamento que han facilitado mi estancia en el CMT.

A mi familia quiero agradecer haber sido el motor durante estos años. A mi padres Ana Beatriz y Francisco, quienes me han provisto de las herramientas necesarias pare ser la persona y profesional que he querido ser. A mis abuelas, hermanos y sobrinos quienes desde la distancia me han brindado su apoyo. Afortunadamente esta familia no es la única que tengo, la familia Figueroa García al completo, a Simón y las Angelas que me han apoyado en cualquiera de las asignaturas de mi vida a las que me pueda referir. A la familia Giménez Albert, que me han recibido como uno más en su familia y a los que siento como parte de la mía también, ¡os debo muchos momentos inolvidables de mis años en Valencia! A Finalmente, los tíos adoptados Vicente y Marisel, y a sus hijas Neris y Zoe a a las que he visto crecer con fortuna cerca de mí.

Por último...¡Sí, porque es la más importante!, a Olga mi compañera de vida, a quien una coincidencia puso en mi camino ¡bendita coincidencia! Gracias por el sacrificio, el apoyo incondicional y empuje durante estos años. Tu determinación en la vida es sin duda el aliciente que me ha hecho no desmayarme ahora que recorro el km 41 de esta maratón. Gracias por estar en cada avituallamiento con el agua, la comida y el gel para reponer fuerzas. Sin tu ayuda no podría haber llegado a este punto. ¡Ya veo la meta!, ¡La medalla es para ti!

Resumen

A lo largo de las dos últimas décadas del final del siglo XX y aún hasta la actualidad la industria de automoción ha recurrido al entendimiento de los procesos que gobiernan el proceso de combustión. En el caso del motor Diesel, muchos son los aportes que se han construido en tal sentido a partir de estudios sobre el motor propiamente dicho o a través de herramientas que simulan las condiciones de operación de este. Con ello, la introducción de medidas no intrusivas de carácter óptico ha impulsado el entendimiento del fenómeno de combustión Diesel. Conceptos tan amplios como el Dec establecen la morfología de la llama Diesel generados a partir de la visualización del proceso de inyección/combustión.

A partir de esta fotografía del proceso de combustión, se ha hecho un revisión de cuál es el estado del arte actual con la finalidad de identificar los aspectos de inyección y combustión que en la literatura permanecen aún abiertos al aporte de conocimiento. En ese sentido, se ha identificado que el conocimiento de la evolución transitoria de llamas Diesel resulta contradictoria, bien por el resultado final de penetración o por la dificultad planteada al estudiar chorros reactivos. Mientras que en condiciones de combustión por difusión, la cuantificación del hollín y su temperatura parece estar relacionada con un alta incertidumbre asociada al desarrollo experimental, en sí, con el resultado final.

El enfoque de esta tesis es experimental, y por tanto se plantean las condiciones experimentales para afrontar de manera idónea la investigación con dos técnicas ópticas principales, la visualización schlieren y la termometría de dos colores. Respecto a la primera, la solución al fenómeno de saturación de sensores de cámara de visualización ha permitido establecer una medida fiable de la penetración del chorro reactivo. Este valor agregado a la técnica, ha permitido evaluar dos instalaciones disponibles en el grupo de investigación donde se ha desarrollado la investigación y definir el entorno experimental técnica + instalación ideal para la descripción de evolución transitoria de la llama. Respecto a la termometría de dos colores, la puesta a punto experimental ha permitido establecer las bases para establecer una relación espacial de imágenes con información espectral diferente y mejorar sensiblemente el resultado de la técnica.

Como resultados, el apoyo en técnicas estándar para la investigación de la longitud de lift-off de llamas de difusión, ha permitido establecer comparativamente que la medida a partir de la imagen de schlieren con resolución temporal es factible a partir de la expansión radial en la zona de autoencendido. Los resultados de schlieren: penetración, ángulo de chorro inerte/reactivo y el lift-off han apoyado la descripción de las fases de la evolución de la penetración de llama, que en comparación con un chorro-inerte se ha visto modificada por el establecimiento de la combustión. Dependiendo de la expansión radial y axial de la llama la

descripción del proceso puede modificarse según varían las condiciones de combustión, aunque el marco global de la descripción se mantienen las 5 fases de penetración: *Inerte, autoencendido y expansión, estabilización, aceleración y cuasi estacionalidad*. Por otra parte, la investigación sobre combustibles contrapuestos en la formación de hollín como el n-Heptano y Diesel, han permitido establecer la sensibilidad de indicadores de la cantidad de hollín y su en diferentes condiciones de operación evaluadas en un motor óptico.

En conjunto, el entendimiento de la evolución del penetración del frente y de llama y la formación de hollín en llamas difusivas provee de una matriz de ensayos extensa con la cual es posible alimentar modelos de cálculos complejos como el CFD y así, proporcionar elementos adicionales para el entendimiento de los procesos de expansión radial y axial de la llama. Algo que en este documento se ha analizado sólo desde el punto de vista macroscópico.

Resum

Al llarg de les dues últimes dècades del final del segle XX i encara fins a l'actualitat la indústria d'automoció ha recorregut a l'enteniment dels processos que governen el procés de combustió. En el cas del motor Diesel, molts són les aportacions que s'han construït en aquest sentit a partir d'estudis sobre el motor pròpiament dit o a través d'eines que simulen les condicions d'operació d'aquest. Amb això, la introducció de mesures no intrusives de caràcter òptic ha impulsat l'enteniment del fenomen de combustió dièsel. Models conceptuals tan amplis com el de Dec estableixen la morfologia de la flama Diesel generats a partir de la visualització del procés d'injecció / combustió.

A partir d'aquesta fotografia del procés de combustió, s'ha fet un revisió de quin és l'estat de l'art actual amb la finalitat d'identificar els aspectes d'injecció i combustió que en la literatura romanen encara oberts a l'aportació de coneixement. En aquest sentit, s'ha identificat que el coneixement de l'evolució transitòria de flames Diesel resulta contradictòria, bé pel resultat final de penetració o per la dificultat plantejada en estudiar dolls reactius. Mentre que en condicions de combustió per difusió, la quantificació del sutge i la seva temperatura sembla estar relacionada amb una alta incertesa associada al desenvolupament experimental, en si, amb el resultat final.

L'enfocament d'aquesta tesi és experimental, i per tant es plantegen les condicions experimentals per afrontar de manera idònia la investigació amb dues tècniques òptiques principals, la visualització schlieren i la termometria de dos colors. Respecte a la primera, la solució al fenomen de saturació de sensors de cambra de visualització ha permès establir una mesura fiable de la penetració del doll reactiu. Aquest valor afegit a la tècnica, ha permès avaluar dues instal·lacions disponibles en el grup de recerca on s'ha desenvolupat el treball i definir l'entorn experimental tècnica + instal·lació ideal per a la descripció d'evolució transitòria de la flama. Respecte a la termometria de dos colors, la posada a punt experimental ha permès establir les bases per establir una relació espacial d'imatges amb informació espectral diferent i millorar sensiblement el resultat de la tècnica.

Com a resultats, el suport en tècniques estàndard per a la recerca de la longitud de lift-off de flames de difusió, ha permès establir comparativament que la mesura a partir de la imatge de schlieren amb resolució temporal és factible a partir de l'expansió radial en la zona d'autoencesca. Els resultats de schlieren: penetració, angle de doll inert / reactiu i lift-off han donat suport a la descripció de les fases de l'evolució de la penetració de flama, que en comparació amb un doll inert s'ha vist modificada per l'establiment de la combustió. Depenent de l'expansió radial i axial de la flama la descripció del procés pot modificar-se segons varien les condicions de combustió, tot i que en el marc global de la descripció es mantenen les 5 fases

de penetració: Inert, autoencesesa i expansió, estabilització, acceleració i quasi estacionalitat . D'altra banda, la investigació sobre combustibles contraposats en la formació de sutge com el n-heptà i Diesel, han permès establir la sensibilitat d'indicadors de la quantitat de sutge i la seva en diferents condicions d'operació avaluades en un motor òptic.

En conjunt, l'enteniment de l'evolució del penetració del front de flama i la formació de sutge en flames difusives proveeix d'una matriu d'assajos extensa amb la qual és possible alimentar models de càlculs complexos com el CFD i així, proporcionar elements addicionals per l'enteniment dels processos d'expansió radial i axial de la flama. Una cosa que en aquest document s'ha analitzat només des del punt de vista macroscòpic.

Summary

Since the last two decades of the XX century and still nowadays the automotive industry has resorted to the very understanding of the combustion process. Regarding the Diesel engine many contributions have been built from the machine itself or test rigs that simulate real operating conditions. Based on that, the use of non-intrusive optical techniques has propelled the understanding of Diesel combustion phenomena, and extended conceptual models as Dec establishes the Diesel flame morphology from the visualization of the injection/combustion process.

From such combustion process picture, a review of the current state of the art has been done in order to assess on the still remain questions of the injection/combustion areas open to knowledge contribution. In that sense, it has been identified that Diesel flame transient evolution turns contradictory either on the final penetration result or the difficulties involved with reacting spray studies. While the quantification of the soot and its temperature in diffusive conditions might be related with high uncertainties of the experimental set-up, i.e. with the final result.

The approach of this thesis is experimental; therefore, it considers the experimental conditions to ideally address the investigation with two main optical techniques, schlieren visualization and the two color method. Regarding the first one, the solution to saturation of the camera sensor enabled a reliable penetration on the reacting spray penetration. This technique added value has helped to evaluate two different test rigs in order to define the ideal environment (optical technique + test rig) to better describe the reacting spray. Regarding two color thermometry, experimental calibration has helped to define the basis to obtain a spatial relationship of images with different spectral information and to significantly improve the technic results.

As a result, using standard techniques to investigate lift-off length of diffusion flames has helped to establish that the schlieren image with temporal resolution is feasible from the radial expansion in the auto-ignition area. Schlieren results: penetration, inert and reactive spray angle and lift-off have supported the description of the evolution of penetration flame phases, which compared with an inert jet have been modified by the establishment of the combustion. Depending on the radial and axial flame expansion the process description can be modified according to the variation of combustion conditions. Although, in the overall description framework the 5 stages of penetration: inert, self-ignition and expansion, stabilization, acceleration and quasi stationarity are kept. On the other hand, research on competing fuels in the formation of soot as n-heptane and Diesel,

has helped to establish the sensitivity of soot indicators under different operating conditions evaluated in an optical engine.

As an overall, understanding the evolution of the flame front penetration and soot formation in diffusive flames provides an extensive data with which it is possible to feed complex calculation models as the CFD and thus, provide additional elements for comprehending the radial and axial flame expansion processes; something that in the present work has been analyzed only from the macroscopic point of view document.

Índice General

1. Introducción

1.1	Contexto y motivación del estudio de chorros Diesel.....	2
1.2	Objetivos del estudio.....	8
1.3	Planteamiento del trabajo y contenido del documento.....	8
1.4	Referencias.....	10

2. Combustión Diesel y diagnóstico óptico

2.1	Introducción.....	14
2.2	Proceso de combustión en chorros Diesel.....	15
2.3	Formación de mezcla en chorros Diesel.....	17
2.3.1.	Flujo interno en inyectores.....	17
2.3.2.	Atomización y coalescencia.....	20
2.3.3.	Evaporación y caracterización macroscópica del proceso de mezcla.....	22
2.4	Combustión de chorros Diesel.....	30
2.4.1.	Secuencia temporal del autoencendido del chorro Diesel.....	31
2.4.2.	Influencia de las condiciones de operación y de inyección sobre el proceso de autoencendido.....	35
2.4.3.	Estructura de la llama de difusión Diesel.....	37
2.4.4.	Evolución transitoria del chorro reactivo.....	48
2.5	Referencias.....	51

3. Materiales y experimentación

3.1	Introducción.....	61
3.2	Caracterización de la inyección	62
3.2.1.	Toberas y geometrías.....	62
3.2.2.	Combustibles y caracterización hidráulica.....	63
3.3	Instalaciones experimentales.....	71
3.3.1.	Motor óptico.....	71
3.3.2.	Instalación de presión, temperatura y flujo constante..	73
3.3.3.	Estimación de condiciones de operación.....	76
3.4.	Técnicas de visualización de chorros/llamas de inyección directa.....	79
3.4.1.	Mie-scattering.....	79
3.4.2.	Visualización schlieren.....	83

3.4.2.1. Adaptación a chorros reactivo.....	86
3.4.2.2. Arreglos ópticos.....	87
3.4.2.3. Procesado de imágenes.....	90
3.4.3. Quimioluminiscencia de OH*.....	91
3.4.4. Radiación de amplio espectro.....	92
3.5 Modelado 1-D de mezclas de chorros de inyección directa...	93
3.6 Evaluación del chorro inerte en los entornos experimentales usados.....	95
3.7 Conclusiones.....	102
3.8 Referencias.....	102

4. Evolución transitoria de llamas Diesel

4.1 Introducción.....	109
4.2 Cuantificación de longitud de lift-off mediante visualización schlieren de alta velocidad.....	110
4.2.1. Visualización schlieren como herramienta de medida del lift-off.....	111
4.2.2. Criterio de medida, selección y sensibilidad de LoL _s	114
4.2.3. Evaluación de LoL _s en estudio de llamas Diesel.....	117
4.3 Caracterización de la evolución temporal de la penetración.....	124
4.3.1. Definición de etapas en la evolución temporal del chorro Diesel en ambiente reactivo.....	125
4.3.2. Efecto de los parámetros de motor sobre la evolución de la penetración del chorro Diesel en ambiente reactivo.....	131
4.3.2.1. Presión de Inyección.....	133
4.3.2.2. Temperatura del aire.....	135
4.3.2.3. Densidad del aire.....	136
4.3.2.4. Diámetro de tobera.....	138
4.4 Conclusiones.....	140
4.5 Referencias.....	142

5. Metodología de termometría de dos colores para cuantificación de hollín

5.1 Introducción.....	147
5.2 Metodología de termometría de dos colores.....	147
5.2.1. Material óptico y experimentación.....	151
5.2.2. Procesado de imágenes.....	155
5.2.3. Metodologías de análisis.....	158
5.3 Análisis comparativo del autoencendido y lift-off.....	163

	en combustibles Diesel y n-Heptano.....	
5.4	Formación de hollín en llamas Diesel y n-Heptano en base a variaciones paramétricas.....	166
	5.4.1. Presión de inyección.....	168
	5.4.2. Densidad del aire.....	169
	5.4.3. Temperatura del aire.....	170
	5.4.4. Diámetro de tobera.....	171
5.5	Discusión.....	173
5.6	Conclusiones.....	176
5.7	Anexo.....	179
5.8	Referencias.....	180
 6. Conclusiones y trabajos futuros		
6.1	Conclusiones.....	183
6.2	Trabajos futuros.....	187
6.3	Referencias.....	189
 Bibliografía.....		
		190

Lista de figuras

- 1.1 Ejemplo del trade-off Hollín-NOx. Rangos de temperatura y dosado equivalente de algunas estrategias actuales de combustión adaptado de [12].....
- 1.2 Históricos de número de publicaciones relacionadas con procesos de mezcla Diesel y emisiones contaminantes. Fuentes: SAE [19] y Science Direct [20].....
- 2.1 Definición de fases del proceso de combustión Diesel en comparación con un evento de inyección, adaptada del trabajo de Novella [2]
- 2.2 Flujo interno en toberas transparentes. Visualización del efecto de cavitación en toberas de inyección directa. Izquierda: Imagen adaptada de [18], iluminación difusa del flujo interno en tobera transparente ($d_o= 510 \mu\text{m}$). Derecha: Imagen adaptada de [19], shadowgraph del flujo interno en tobera cónica ($d_o= 200 \mu\text{m}$; $P_{iny}= 800 \text{ bar}$)
- 2.3 Esquema de la estructura del chorro Diesel
- 2.4 Evolución temporal de la fase líquida y vapor de chorro Diesel no-reactivo desarrollado en ambiente de presión y temperatura cuasi-estacionario[52].....
- 2.5 Parametrización temporal de penetración de chorro isoterma en [12] ($d_o= 156 \mu\text{m}$, $P_{iny}=30 \text{ MPa}$, $\rho_{aire}= 15.5 \text{ kg/m}^3$). El tiempo t_{oi} , es relativo al origen de la inyección (evaluado por el autor). El tiempo t_{od} es relativo al origen de la penetración desarrollada
- 2.6 Evolución temporal del ángulo de chorro en condición de Spray B adaptado de [70]. ($d_o= 90 \mu\text{m}$, $P_{iny}=150 \text{ MPa}$; $\rho_{aire}= 22.8 \text{ kg/m}^3$; $T_{aire}= 440 \text{ K}$). Símbolos indican la distancia a la cual el autor ha ajustado el ángulo de chorro minimizando el error cuadrático medio (ECM)

- 2.7 Figuras adaptadas de Higgins et al. [74]. Izquierda: Incremento temporal de la presión (ΔP), liberación de calor aparente (AHRR) y luminosidad relativa durante el proceso de autoencendido de un chorro Diesel en una cámara de combustión de volumen constante. Derecha: Imágenes de amplio espectro de la secuencia de autoencendido (sin filtrar). Condiciones ambiente: 14.8 kg/m³, 1000 K y 21% O₂.....
- 2.8 Resultados de retraso al autoencendido adaptados del estudio de Pickett et al. [83]. Medidas obtenidas del análisis de presión en cámara de combustión de volumen constante. Variación de densidad y temperatura del aire en llamas de difusión de tres combustibles: D2 (Diesel de referencia); D2-EHN (mezcla de Diesel de referencia [99.25%] y C₈H₁₇NO₃ [0.725]); CN80 (mezcla de Hexadecano [76.5%] y C₁₆H₃₄ [23.5%])
- 2.9 Modelo conceptual de llama difusiva Diesel de Dec [92].....
- 2.10 Evolución a la fracción volumétrica de hollín f_v en estudio paramétrico de Pickett y Siebers [89] que incluye variaciones de temperatura del aire, densidad del aire y presión de inyección. (a) Evolución axial, (b) Evolución en coordenadas adimensionales de llama y fracción respecto a la mayor densidad de aire estudiada 30 kg/m³. (c) Evolución axial de la f_v de hollín para distintas presiones de inyección. Símbolos representan medidas de f_v obtenidas por medio de medidas simultáneas del método de extinción de luz e incandescencia láser LII. Línea sólida representa el mejor ajuste polinómico para cada condición estudiada.....
- 2.11 Evolución axial de KL y temperatura de hollín a través de dos colores [3]. Símbolos representan medidas puntuales por medio de extinción de Luz (LE). Parejas de (KL y temperatura) para cada uno de los combustibles empleados por el autor: B05, B30, RME, FT1 y FT2. Efecto de la temperatura del aire, en iso-condiciones de densidad (26 kg/m³) y presión de inyección (50 MPa). Líneas transversales indican la temperatura adiabática llama. Nota: El autor establece una relación entre el KL_{2C} y KL_{LE} tal que: $KL_{LE} = 2.502 KL_{2C}$ (consultar [3] para más detalles).....

- 2.13 Evolución temporal de chorros no-evaporativos ($T_{\text{aire}}=455\text{K}$), no-reactivos (0 % O_2 , $T_{\text{aire}}=900\text{K}$) y reactivos (12 % O_2 , $T_{\text{aire}}=900\text{K}$) en cámara de combustión de volumen constante [81]. Densidad del aire 22.8 kg/m^3 , diámetro de tobera $d_0=108\text{ }\mu\text{m}$, presión de inyección $P_{\text{iny}}=110\text{ MPa}$ y $3000\text{ }\mu\text{s}$ de tiempo de energización del inyector.....
- 3.1 Evolución de tasa de inyección y flujo de cantidad de movimiento de toberas mono-orificio del estudio. $P_{\text{iny}}=100\text{ MPa}$. Contrapresión 5.5 MPa . Valores de $fCdM$ del Diesel se han tomado del trabajo de Gimeno [4] y Nerva [5] para las toberas B y C respectivamente.....
- 3.2 Valores promedios de medidas tasa de inyección y $fCdM$. Las medidas de $fCdM$ relacionadas con Diesel se han tomado del trabajo de Gimeno [4] en el caso de la tobera B, y del trabajo de Nerva [5] para la tobera C
- 3.3 Coeficientes resultantes de la caracterización hidráulica de toberas B y C en función del número de Reynolds. Los símbolos resaltados corresponden a medidas que forman parte de este estudio, el resto corresponden a cálculos que incluyen $fCdM$ tomados de [4] para la Tobera B y [5] para la Tobera C.....
- 3.4 Motor óptico. Cámara de combustión para estudio de toberas mono-orificio.....
- 3.5 Esquema de la maqueta CPF [27]. Principales componentes en arreglo coincidente con el flujo de gas. 1) compresor de aire, 2) tanques de alta presión, 3) válvula principal, 4) filtro de alta presión, 5) manómetro de presión 6) regulador de presión 7) unidad de control 8) Calentador principal, 9) cámara de combustión, 10) sistema de refrigeración del inyector, 11) sistema de enfriamiento de la instalación, 12) intercambiador de calor, 13) intercambiador de calor 4) filtro de alta presión con drenaje, 15) válvula de regulación de flujo, 16) manómetro de presión, 17) filtro ciclónico, 18) grupo de 4 filtros de baja presión 19) manómetro de presión, 20) sensor de O_2 , 21) medidor de flujo, 22) mezcla de oxígeno y nitrógeno , 23) drenaje, 24) válvula de apertura del circuito exterior, 25) válvula de apertura del circuito, 26) tanque de baja presión.....

- 3.6 Definición de condiciones de densidad y temperatura del aire en la operación del motor óptico (líneas) y la maqueta CPF (símbolos) determinada a partir de ciclos de arrastre. Referencia de locación del pulso de la inyección (línea gris en la parte inferior de la figura). Instante de sincronización de imágenes de 2 colores (línea resaltada), según se mostrará en el capítulo 5.....
- 3.7 Arreglo óptico para medidas de longitud líquida en motor óptico.....
- 3.8 Contorno detectado por el algoritmo de procesamiento LRT. Imagen de longitud líquida captada en el motor óptico. Condición AD, $P_{iny}=100$ MPa instante 2.52 ms después de la energización del inyector (ASOI, acrónimo en inglés). La imagen corresponde a la región de interés en el procesado.....
- 3.9 Evolución temporal de longitud líquida de Diesel y n-Heptano en el motor óptico bajo las condiciones AD (ver Tabla 3.6). $P_{iny}= 100$ MPa; Tobera B.....
- 3.10 Descripción del efecto de shadowgrah/schlieren aplicado en estudios de chorros Diesel tanto inertes como reactivos.....
- 3.11 Efectos de los filtrados cromáticos y temporal en la evolución de la penetración de llama en imágenes schlieren en maqueta CPF. Apertura de 4mm de diámetro en el plano Fourier (véase Figura 3.10c). Condiciones de ambiente de Spray-A y AD descritas en las Tabla 3.2 y Tabla 3.6, respectivamente. Tobera A (Spray-A) y Tobera C (Condición AD); $\Delta P_{inv}= 50$ MPa.....
- 3.12 Arreglos ópticos usados en investigación de chorros inertes y reactivos. a. Estudios no-reactivos de longitud líquida y schlieren en el motor óptico. b. Estudios reactivos de método de dos colores y schlieren en el motor óptico. c. Estudios reactivos de schlieren y quimioluminiscencia del OH* en la maqueta CPF.....
- 3.13 Arriba: Quimioluminiscencia del OH* a lo largo del eje del chorro en las condiciones de spray-A. Bajo: Análisis de lift-off resultante del método de la rodilla (“knee” en inglés). $T_{aire}=900$ K, $\rho_{aire}=22.8$ kg/m³, $P_{iny}= 150$ MPa y Tobera A.....

- 3.14 Izquierda: Evolución temporal de máxima intensidad luminosa en condiciones definidas por Lillo en [52] con temperaturas del aire de 750 K y 900 K. Derecha: Luminosidad captada en el instante 1776 μs después de la energización del inyector [ASI, acrónimo en inglés]; valor encerrado en corchetes define el ajuste de contraste de la imagen a lo largo del eje del chorro.....
- 3.15 Escalado de máxima longitud líquida en el motor óptico y maqueta CPF. Influencia de la presión de inyección, temperatura del aire, densidad del aire y diámetro de tobera a partir de las condiciones nominales NO del estudio ($T_{\text{aire}} = 826\text{K}$, $\rho_{\text{aire}} = 21.2 \text{ kg/m}^3$), $P_{\text{iny}} = 100 \text{ MPa}$ y n-Heptano como combustible inyectado.....
- 3.16 Evolución temporal y desviación típica de la penetración. Chorros no-reactivos (bandas de desviación) y reactivos (área), desarrollados en el motor óptico y maqueta CPF, respectivamente. Condición AT de *Figura 3.6*; Tobera C y n-Heptano como combustible inyectado...
- 3.17 Evolución del chorro en condiciones evaporativas no-reactivas (arriba) desarrollado en el motor óptico. Condiciones AT; Tobera C y $P_{\text{iny}} = 100 \text{ MPa}$. *Nota: Las etiquetas temporales están referidas al tiempo SOI*.....
- 3.18 Evolución temporal del coeficiente de variación COV dentro del estudio de penetración en condiciones no-reactivas. Combustible: n-Heptano. Variaciones: Temperatura (superior); Densidad (centro); Presión de inyección (inferior).....
- 4.1 Evolución temporal del volumen de mezcla y productos de combustión en maqueta CPF. Condiciones NO en la Tabla 3.6; $P_{\text{iny}} = 50 \text{ MPa}$ y Tobera B.....
- 4.2 Imágenes PIV del campo de velocidades en zona externa de la nube de mezcla aire-combustible durante el inicio de combustión del Spray-A. Arriba: Durante el inicio de combustión (0.462 ms ASOI). Abajo: Durante el final del proceso de inyección (1.652 ms ASOI). Líneas rojas verticales representan la medida de lift-off medido mediante quimioluminiscencia de OH*. Datos extraídos de base de datos disponible en la ECN [11,12].....

- 4.3 Definición de medida instantánea de lift-off. Tiempo ASOI: 1.787 ms. Condiciones NO en maqueta CPF de la Tabla 3.6. $P_{iny} = 50$ MPa, Tobera B. Reactivo (línea roja solida) y contorno lineal inerte (línea punteada amarilla). Bajo: Contorno detectado y determinación del lift-off a partir de la imagen schlieren.....
- 4.4 Umbral definitorio del LoL_s (símbolos rojos). Medida de LoL_s de todo el evento de inyección de Figura 4.1 (Símbolos). Ejemplo de procesado (línea punteada) y rango mínimo/máximo de variación medidas de LoL_s (área abarcada por flechas).....
- 4.5 Relación entre técnicas a lo largo de la evolución temporal del lift-off para la variación de la temperatura del aire de la Tabla 3.2. Medidas de schlieren registradas en CMT (verde). Medidas de lift-off a través de luminosidad, CMT (azul) y SNL (roja); $P_{iny} = 150$ MPa.....
- 4.6 Imágenes con tiempo largo de exposición (3ms) del OH^* compuestas con contornos instantáneos detectados (puntos amarillos) en imágenes schlieren correspondientes a 3.3 ms ASOI. Zonas aguas arriba de LoL_s oculta por el área gris. Líneas rojas marcan el LoL_{OH} . Izquierda: Efecto de temperatura del aire. Derecha: Efecto de la presión de inyección.....
- 4.7 Comparación cuasi-estacionaria de schlieren LoL_s y la medida LoL_{OH} . Los símbolos se refieren a la variación de temperatura del estudio de la Tabla 3.6. $\rho_{aire} = 22.8$ kg/m³ y presión de inyección. LoL_s es el promediado temporal a lo largo del tiempo de exposición de la cámara destinada a registrar la quimioluminiscencia OH^*
- 4.8 Imagen compuesta de la penetración inerte (imagen-contorno en mitad superior) y reactiva (imagen-contorno en mitad inferior) para las condiciones AT de la Tabla 3.6. Maqueta CPF y $P_{iny} = 50$ MPa, diámetro de Tobera C ($d_o = 82$ μ m).....
- 4.9 Arriba: Evolución temporal de la penetración y medidas de lift-off LoL_s en condiciones AT de la Tabla 3.6 (Maqueta CPF). Bajo: Evolución temporal del ratio de penetraciones (S_r/S_i). Diámetro de tobera $d_o = 82$ μ m (Tobera C).....
- 4.10 Arriba: Superposición del mejor ajuste de contornos inertes (línea amarilla) y reactivos (líneas rojas). Bajo: Evolución temporal del ratio de expansión Θ_r/Θ_i para las condiciones AT de la Tabla 3.6 (Maqueta CPF); $P_{iny} = 50$ MPa; Tobera C.....

- 4.11 Arriba-izquierda: Comparativa de penetración derivada de experimentación y de modelado 1-D; inerte (azul); reactivo (rojo) en la parte superior de la figura. Condiciones experimentales iguales a las de la Figura 4.8. Arriba-derecha: La evolución del dosado equivalente en el eje de chorro inerte se muestra con la finalidad de mostrar el cómputo del dosado equivalente en la locación del Lift-off (ϕ_{LoL}). Bajo: Comparativa de la evolución temporal del ratio de penetraciones experimental y modelado.....
- 4.12 Evolución de chorro reactivo para la variación paramétrica P_{iny} . Arriba: Evolución temporal del ratio de penetración (S_r/S_i). Bajo: Evolución temporal del ratio de expansión radial (Θ_r/Θ_i). La variación corresponde a la variación AT (Maqueta CPF) de la Tabla 3.6. Tobera C.....
- 4.13 Evolución temporal de los ratios de penetraciones y expansión radial en la variación paramétrica de temperatura del aire de la Tabla 3.6 (Maqueta CPF). $P_{iny}= 50$ MPa; $\rho_{aire}= 21.2$ kg/m³; Tobera C.....
- 4.14 Evolución temporal de los ratios de penetración y expansión radial en la variación paramétrica de la densidad del aire de la Tabla 3.6. $P_{iny}= 50$ MPa; $T_{aire}= 826$ K (Maqueta CPF); Tobera C.....
- 4.15 Evolución temporal de los ratios de penetraciones y expansión radial en la variación paramétrica de diámetro de tobera (B-138 μ m C-82 μ m); $P_{iny}= 50$ MPa; $T_{aire}= 870$ K; $\rho_{aire}= 21.2$ kg/m³ (Maqueta CPF)....
- 4.16 Evolución temporal del ratio de penetraciones en condiciones AD (maqueta CPF) de la Tabla 3.6. $\rho_{aire}= 28.4$ kg/m³; $T_{aire}= 826$ K, Tobera B.....
- 5.1 Solución analítica al modelo de radiancia de la ecuación 5 y distribución de zonas de error.....
- 5.2 Impacto de configuraciones ópticas sobre el desarrollo y estimación del modelo de radiancia de la termometría de dos colores. Arriba: Arreglos ópticos. Medio: Radiancia capturadas a partir de una esfera integrada (radiador difuso ideal). Bajo: Disposición del espacio de soluciones del método.....

- 5.3 Imagen original de radiancia de $I_m = 650$ nm en conjunto con distintos umbrales de segmentación, 10% es el seleccionado para el procesados de las imágenes del estudio.....
- 5.4 Tratamiento digital de imágenes de radiancia I_{m-550} e I_{m-650} . Superposición, desplazamiento y rotación.....
- 5.5 Ejemplo de calibración del nivel digital captado con el sistema óptico empleado en el estudio.....
- 5.6 Definición de la imagen PAI.....
- 5.7 Distribución global de zonas de error resultante del procesado de imágenes en el global del estudio paramétrico en la Tabla 3.6.....
- 5.8 Análisis 1-D de la distribución de KL_{2C} y T_{2C} . Dispersión ciclo a ciclo frente a la imagen PAI. (Condición BD-Tobera C -100 MPa-Diesel).....
- 5.9 Evolución temporal de chorros reactivos en cámara CPF de combustión. Efectos de la presión de inyección, densidad y temperatura del aire a partir de imágenes de schlieren. Nota: Círculos rojos señalan instante de observación del autoencendido.....
- 5.10 Efectos sobre el autoencendido del Diesel y n-Heptano en las variaciones paramétricas de la Tabla 3.6 estudiadas en el motor óptico. Superior-Izquierda: Presión de inyección y densidad del aire. Superior-Derecha: Temperatura del aire. Inferior-Izquierda: Diámetro de tobera y n-Heptano. Inferior-Derecha: Diámetro de tobera y Diesel.....
- 5.11 Relación entre longitudes características de evaporación (LL) y combustión LoL_s . Análisis cualitativo de la formación de hollín en llamas Diesel y n-Heptano en el motor óptico (condición BD; Tobera C).....
- 5.12 Efectos de la presión de inyección a lo largo del eje de llama de temperatura y KL del hollín. (Variación paramétrica NO; Tobera-B).....
- 5.13 Efectos de la densidad del aire sobre la distribución de temperatura y KL del hollín (Variación paramétrica Tobera B; $P_{iny}=100$ MPa).....

- 5.14 Efectos de la temperatura del aire sobre la distribución de temperatura y KL del hollín (Variación paramétrica Tobera B; P_{iny} : 100 MPa).....
- 5.15 Efectos del diámetro de tobera sobre la distribución de temperatura y KL del hollín (Variación paramétrica NO; P_{iny} = 50 MPa). Líneas discontinuas en los gráficos superiores son los radios de llama determinados a partir de la imagen binaria obtenida en el procesado digital.....
- 5.16 Relación entre englobamiento de aire en la base de la llama y KL_{max} estimado a partir de la solución empírica de la ecuación 5. Efectos sobre la distribución media en llamas Diesel y n-Heptano. (Tobera-B $d_o=138 \mu m$, variación de densidad).....
- 6.1 Ejemplo de fases de penetración y tasa de liberación de calor para la variación de temperatura del aire desarrollada en el motor óptico (ver Tabla 3.6). P_{iny} = 50 MPa; Condiciones BT y AT; $\rho_{aire}=21.2 \text{ kg/m}^3$ (media a lo largo de la inyección); Tobera B; Combustible: n-Heptano.....

Lista de tablas

- 3.1 Propiedades de combustibles. Datos rescatados de literatura: ¹ [5],
² [6], ³ [7] y [8].....
- 3.2 Definición del ensayo del Spray-A definido por la ECN [1,2]. (*)
Variación paramétrica incluida en el estudio.....
- 3.3 Parámetros de inyección considerados para la caracterización
hidráulica y desarrollo del estudio comparativo entre
instalaciones.....
- 3.4 Características constructivas del motor óptico.....
- 3.5 Características constructivas de la maqueta CPF.....
- 3.6 Definición de las condiciones termodinámicas de ensayos
desarrollados en el motor óptico y maqueta CPF. Izquierda: Presión y
temperatura de admisión en cada condición de operación. Derecha:
Condiciones de temperatura y densidad del aire en la maqueta
CPF.....
- 3.7 Cámaras y material óptico. Puesta a punto específica de cada técnica
e instalación. (*) Ambas técnicas se han desarrollado de manera
simultánea.....
- 3.8 Modelo empírico de la máxima longitud líquida en función de los
parámetros variados en el estudio. Incluyendo modelos tanto para el
motor óptico como la maqueta CPF.....
- 4.1 Exponentes de escalado de LoL_s y LoL_{OH} encontrados en el análisis
estadístico del modelo empírico de la ecuación 1.- Incluye
condiciones de operación de la Tabla 3.6 y condiciones de Spray-A
definidas por la ECN, definidas en la Tabla 3.2.....
- 5.1 Resultados del análisis estadístico para la predicción del retraso al
autoencendido.....

Nomenclatura

Latinos

1-D	Unidimensional
A,a,b,c,d,k	Constantes de escalado
A	Area
a	Velocidad del sonido
A/F	Proporción másica aire-combustible
c_1 o c_2	Constantes de Plank
C_a	Coefficiente de área
C_d	Coefficiente de descarga
C_v	Coefficiente de velocidad
C_m	Coefficiente de momento
d	Diámetro de salida
D_t	Difusión térmica
d_0	Diámetro nominal
E	Energía de activación del combustible
EZ	Zonas de error en solución del método de dos colores
f_{CDM}	Flujo de cantidad de movimiento
f_v	Fracción volumétrica
I	Radiancia
I_m	Imagen de rancia
k	Número de Gladstone-dale

KL	Densidad óptica con K, coeficiente de extinción y L, camino óptico
LL	Longitud líquida máxima (Liquid Length)
LoL	Longitud de liff-off (Liff-off Length)
\dot{m}	Flujo másico
\dot{M}	Flujo de cantidad movimiento
m_i	Pendiente inicial de penetración
m_p	Pendiente de la fase desarrollada de penetración
n	coeficiente de refracción
P	Presión
R	Constante de gases universales
Rs	Sección transversal del chorro
Re	Número de Reynolds
S	Penetración del chorro
S_L	Velocidad de propagación de llama laminar
T	Temperatura
t	Tiempo
$t+$	Escala adimensional temporal de chorro
t_{oi}	Tiempo de origen de inyección
t_{od}	Tiempo de origen de fase desarrollada de chorro
tr	Tiempo de transición de penetración
$x+$	Escala adimensional axial de chorro
U	Velocidad
$f o Z$	Fracción de mezcla

Griegos

α	Coefficiente de absorción empírico. Considera el efecto de partículas superpuestas
ε	Emisividad
Δ	Incremento
λ	Longitud de onda
ϕ	Dosado de mezcla
ρ	Densidad
τ	Retraso al autoencendido
θ	Ángulo de chorro

Subíndices y superíndices

0	Relativo a condiciones iniciales
$550,650$	Relativo a longitud de onda
$2C$	Relativo al método de dos colores
adm	Relativo a la admisión del motor
CPF	Relativo a la maqueta de presión y flujo constante
$efec$	Efectiva
eq	Equivalente
ext	Extinción
f	Relativo a combustible
i	Relativo a chorros no-reactivos
ID	Retraso al autoencendido
Iny	Relativo a inyección

<i>LoL</i>	Relativo a la longitud de lift-off
<i>Msk</i>	Mascara binaria de imagen
<i>MO</i>	Relativo al motor óptico
<i>m,t</i>	Relativo a imágenes e instantes determinados
<i>OH</i>	Relativo a quimioluminiscencia del radical OH*
<i>r</i>	Relativo a chorros reactivos
<i>s</i>	Relativo a la técnica óptica schlieren
<i>st</i>	Estequiométrico

Acrónimos

AHRR	Tasa de liberación de calor aparente (Apparent Heat Release Rate)
ASI	Tiempo transcurrido desde la energización del inyector (After Start of Inyection)
ASOE	Tiempo transcurrido después del inicio de energización (After Start of Energizing)
ASOI	Tiempo transcurrido después del inicio de inyección (After Start of Inyection)
CFD	Fluido dinámica computacional (Computational Fluid Dynamics)
COV	Coefficiente de variación (Coefficient of Variations)
CPF	Flujo a presión constante
ECN	Red de trabajo de combustión en motores (Engine Combustion Network)
ECM	Error cuadrático medio
ECU	Centralita de control del motor (Electric Control Unit)
EGR	Recirculación de gases de escape (Exhaust Gas Recirculation)
EOI	Final de inyección (End of Inyection)
HCCI	Autoencendido por compresión de mezclas homogéneas (Homogenous Charged Compressed Ignition)

ICCD	Dispositivo intensificado de cargas acopladas (Intensified Charged Coupled Device)
ID	Retraso al autoencendido (Ignition Delay)
(P)LIF	Fluorescencia (Planar) inducida por láser (Planar Laser Induced Fluorescence)
(P)LII	Incandescencia (Planar) inducida por láser (Planar Laser Induced Incandescence)
(A)PMS	(Antes de) Punto muerto superior
LE	Extinción de luz (Laser Extinction)
LNT	Trampa pobre de NOx (Lean Nox Trap)
LRT	Loglikelihood Ratio Test
LTC	Combustión de baja temperatura (Low Temperature Combustion)
ND	Niveles digitales
PCCI	Autoencendido por compresión de mezclas parciales (Partially Charged Compressed Ignition)
PIV	Medidas de velocidad de partículas mediante visualización (Particle Image Velocimetry)
RCCI	Autoencendido por compresión y reactividad controlada (Reactivity Controlled Compressed Ignition)
RoHR	Tasa de liberación de calor (Rate of Heat Release)
SAE	Sociedad de ingenieros de automoción (Society of Automotive Engineers)
SCR	Reducción catalítica selectiva (Selective Catalytic Reduction)
SNL	Sandia National Laboratories
SOC	Retraso al inicio de combustión (Start of Combustion)
TASI	Tiempo transcurrido desde la energización del inyector (Time After Start of Inyección)
TASI*	Tiempo transcurrido desde el inicio de salida de combustible por la tobera de inyección

TGV Turbina de geometría variable

UV Ultra violeta

Capítulo 1

Introducción

Contenido

1.1 Contexto y motivación del estudio de chorros Diesel.....	2
1.2 Objetivos del estudio	8
1.3 Planteamiento del trabajo y contenido del documento.....	8
1.4 Referencias.....	10

1.1 Contexto y motivación del estudio de chorros Diesel

En un tiempo muy lejano desde el punto de vista tecnológico Rudolf Diesel comenzó la aventura del diseño del motor que tanto hoy hablamos. A finales del siglo XIX cuando luego de infructuosos intentos de ponerlo en marcha, el motor Diesel mostro su capacidad de generar trabajo con una eficiencia que duplicaba a la del motor de vapor, sin duda la carrera comenzó. Hablamos de llevar un motor pensado para ser un gigante estacionario a un diminuto y competidor en el campo de vehículos de pasajeros.

Aunque con relativa rapidez, en la segunda década del siglo XX, el motor Diesel irrumpe en el ámbito comercial agrícola. Dichos intentos se veían limitados por aspectos, que aún en la actualidad son y seguirán siendo de interés tecnológico como son: el arranque en frío o bien la capacidad de los sistemas de inyección. Con soluciones como las de Bosch para la producción de sistemas de inyección eficientes en motores Diesel rápidos, la escalada se hizo una realidad con aplastantes cifras de consumo que superaban hasta en 4 litros menos a sus competidores en el ámbito del motor gasolina.

En la historia de la producción en masa de motores Diesel, hemos visto como a lo largo del tiempo estos motores han incrementado su potencia hasta 8 veces para una misma área de pistón. La radiografía del motor actual no es más que el acople de distintos sub-grupos que se sincronizan en aspectos como la eficiencia energética y responsabilidad medioambiental. La alta complejidad tecnológica de los motores Diesel actuales responden de manera simultánea a ambos requerimientos. Cuan complejo, y a la vez cuanto ha madurado a lo largo del siglo XX, principalmente a través de:

El motor: Desde el punto de vista constructivo el motor Diesel evolucionó durante 1920-1930 en sentido de reducir su tamaño para alcanzar las dimensiones para un vehículo de pasajeros. Con la aparición de motores Diesel rápidos [1], la reducción del ruido y vibraciones del motor Diesel fueron puntos en los cuales se han desarrollado mejoras para adaptarlos a la diversidad del parque automotriz de vehículos de pasajeros, desde transporte masivo hasta turismo de uso familiar.

El sistema de inyección: Abandonando los viejos sistemas de inyección mediante aire comprimido, ciertamente la revolución Diesel comienza con la aparición de sistemas en 1937 que permitían abandonar las bajas frecuencias de inyección (200 rpm) mediante el uso de bombas de inyección que

aumentaban la frecuencia del evento que mejoraban la entrega de potencia para regímenes medios-altos (3000-4000 rpm), mientras que el consumo de combustible se reducía notablemente. La aparición de bombas rotativas durante los años 60 y su continuo desarrollo permitió alcanzar altos niveles de presión de inyección (900 bar, en 1980). Paralelamente, el desarrollo de sistemas *common-rail*, con la aplicación de bombas de baja y alta presión, permitían mejorar la eficiencia de la inyección y alcanzar altas presiones de inyección, mejorando consecuentemente, la entrega de potencia y el consumo específico del motor Diesel, que desde finales del siglo XX hasta la actualidad se ha soportado en el uso de inyectores de diámetros cada vez más reducidos en lo que bien se entiende dentro del industria de automoción como parte del “downsizing” del motor Diesel actual [2].

La Sobrealimentación: Ya para los primeros pasos del motor Diesel, la sobrealimentación formaba parte de los sistemas alternativos que por un lado, intentaban reducir o mitigar la pérdida de potencia de motores que en entornos de gran altitud sufrían debido a la disminución de la densidad del aire en el sistema de admisión. Por otro lado, en condiciones de funcionamiento normales buscaban incremento de la presión en la admisión del motor que conllevaba a un aumento del gasto de aire del motor, de manera que la potencia del motor aumentaba. Las soluciones desarrolladas durante finales del siglo XIX y principios del siglo XX contemplaban el uso de un compresor alternativo que permitía una entrega de potencia de 115 kW a 5500 rpm por parte de un motor de 2 litros. Mientras que la introducción en 1978 de los turbocompresores permitió aprovechar la energía de los gases de escapes para mover una turbina que acoplada axialmente a un compresor, aumentaba la presión en la admisión del motor y a su vez mejoraba el rendimiento térmico del motor.

Notoria es la complejidad de los turbocompresores, ya que hacía necesaria la introducción de sistemas de enfriamiento de gases de escape para evitar el excesivo calentamiento y deterioro del sistema de admisión. Aunque la potencia del motor se veía aumentada, estos sistemas se veían limitados en su aporte particularmente en bajos regímenes de motor, donde los gases de escape carecían de energía para mover la turbina. La aparición de turbo compresores de geometría variable (TGV) o de sistemas de doble turbo (con geometrías distintas) permitía la adaptación del área de paso a la entrada de la turbina en el caso del primero mientras que en el caso del segundo, la operación de uno u otro se fija en función del grado de régimen o carga del motor. Independiente de la configuración, ambas han derivado en un mejor aprovechamiento de la energía de los gases de escape bajo cualquier condición de operación del motor.

La unidad de control: La diversidad en las condiciones de funcionamiento del motor (arranque frío, funcionamiento en altura, etc.), los sistemas de inyección de presión variable y la multifuncionalidad de los sistemas de turbo alimentación, hacía necesario un sistema que fuese capaz de interpretar las condiciones idóneas de los distintos subsistemas para mantener la operación del motor dentro de los límites de confort y conducción exigidos por el mercado. La Unidad de Control (Electric Control Unit, ECU) introducida en vehículos en el año 1990 abrió el campo de desarrollo de calibración de motores, donde múltiples variables son afinadas para alcanzar objetivos pre-definidos por el fabricante y donde un compendio de condiciones de operación y control fijan las estrategias actuales para garantizar dentro del marco regulador de emisiones, la conducción y prestación del motor demanda por el consumidor final.

Los elementos anteriores están relacionados entre sí por el proceso de combustión que tiene lugar en el cilindro a partir de unas condiciones de aire proporcionadas por el sistema de sobrealimentación, y está gobernado, como más adelante se verá, por el sistema de inyección. En el desarrollo de este proceso, han cobrado interés aspectos como los combustibles de origen renovable, los nuevos sistemas de combustión o los sistemas de post-tratamiento. Ambos tres se relacionan con un aspecto no tratado hasta ahora, y es la generación de emisiones contaminantes.

La razón principal de este interés es el carácter nocivo de elementos generados durante y después del proceso de combustión como son el Monóxido de Carbono (CO), Partículas (PM), Hidrocarburos sin quemar (HC) y Óxidos de Nitrógeno NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$). La aparición de las primeras leyes de regulación de emisiones en los Estados Unidos, a principios de la década del 70 [3] han propiciado el estudio de los procesos de combustión, que han sido el “motor” de la investigación que ha empezado en aquellos tiempos y que perdurará algunas más. Y no porque el número de vehículos de pasajeros del parque automotor mundial aumente (cifras de la Asociación Europea de Fabricantes de Automóviles advierten un aumento de la matriculación de vehículos de pasajeros sostenible de +14% el último año [4]), sino porque mundialmente el tráfico de vehículos pesados se visiona sin alternativas medianamente tangibles como la electrificación y/o la propulsión híbrida. Todo ello, ha resultado en la implantación de normativas anticontaminantes cada vez más restrictivas, que en un futuro cercano puede que sean llevadas al campo de la medida en tiempo real, pues las actuales medidas en bancos de pruebas parecen distar bastante de los patrones de emisiones en la conducción real [5].

La combustión Diesel convencional y las restricciones impuestas por legislación han exprimido al máximo las capacidades del motor para limitar el neto de emisiones en el escape del motor con mínimo efecto en las prestaciones del motor. Así, la reducción por legislación de los límites de NOx desde 0.5 g/km en EUR3 hasta un 0.08 en EUR6 efectivamente ha impactado en la prestación y el consumo, siendo la gran asignatura del desarrollo de vehículos actualmente. La utilización de pre-inyecciones y post-inyecciones como conceptos nuevos dentro de la combustión se han investigado como elementos que ayuden en la mejora del consumo y las emisiones, aspectos antagónicos entre sí [6,7]. Mientras que los sistemas de inyección common rail de alta presión y de acción rápida [8] al igual que los biocombustibles [9] han dominado la investigación de los componentes del sistema de inyección y su impacto tanto en las emisiones como en la durabilidad del motor [10]. Por otra parte, la introducción de la recirculación de gases de escape para reducir la formación de NOx suele aumentar efectivamente el consumo específico del motor [11]. En este punto, la aparición de nuevos conceptos de combustión surge como alternativas para la reducción de contaminantes. La idea base de estos conceptos de combustión se puede observar en un típico gráfico de trade-off en la *Figura 1.1*. En los términos axiales de la gráfica, las tendencias actuales son combustiones Diesel que tienen

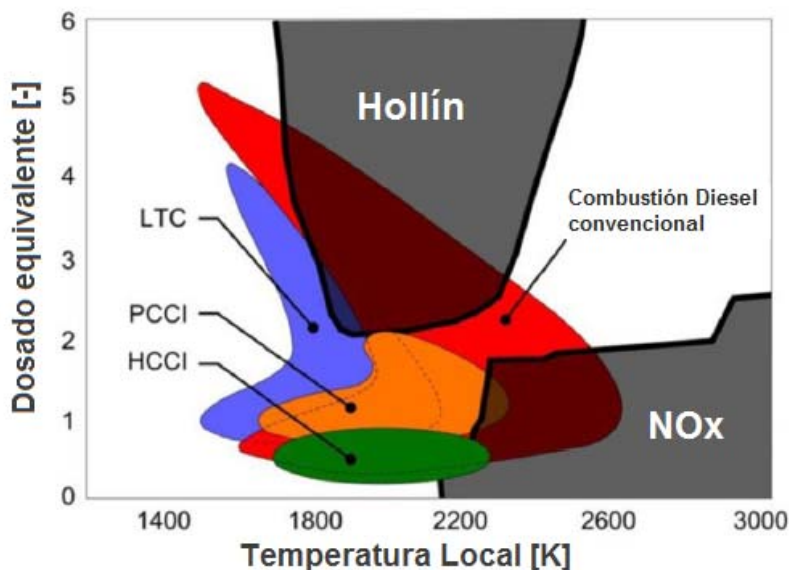


Figura 1.1.- Ejemplo del trade- Hollín-NOx. Rangos de temperatura y dosado equivalente de algunas estrategias actuales de combustión adaptado de [12].

como objetivo reducir el dosado de mezcla y reducir la temperatura de combustión para así encontrar una combustión “limpia”. Los RCCI [13], HCCI [14], PCCI [15], LTC [16], entre otros [17] son el compendio de conceptos alternativos a la combustión convencional, incluso la aplicación de ciclos como Atkinson y Miller [18] parecen tener auge hoy en día como conceptos de interés de motor, claro está por su impacto directo en el nivel de emisiones. Por supuesto, cada uno de estos conceptos está asociado a problemáticas y ventajas definidas por cada uno de estos autores, que no es menester de este documento enumerar.

Finalmente, la aparición de sistemas de post-tratamiento como los filtros de partículas (DPF acrónimo en inglés) o, trampas pobres de NOx (LNT acrónimos en inglés) y sistemas de reducción catalítica selectiva (SCR acrónimo en inglés) para la absorción y transformación de NOx en inertes son elementos que parecen ser imprescindibles de la arquitectura del motor actual y de corto plazo.

Sin embargo, cabe destacar que la investigación en el campo de combustión tradicional, controlada por mezcla no cesa. Más bien, coexiste con estos nuevos conceptos de combustión tal como lo refleja la *Figura 1.2*. En la figura, las publicaciones englobadas en el tema procesos de mezcla Diesel y las emisiones contaminantes muestran en conjunto con la evolución de la legislación relativa a la contaminación de motores de combustión que si la legislación es restrictiva, mayor será el interés en la investigación del proceso de combustión. Habiendo dos aspectos fundamentales que siguen siendo estudiados: Por una parte, los sistemas de inyección cada vez más sofisticados que facilitan procesos de mezcla más rápidos con un control detallado incluso del levantamiento de aguja. Por otro lado, el estudio de combustibles que sean sustitutivos a los de origen fósil.

El planteamiento de esta tesis no estará relacionado con el análisis de las prestaciones del motor, sino más bien con el entendimiento de los procesos básicos que ocurren dentro del cilindro. Para ello, son de indudable utilidad las técnicas de diagnóstico óptico y visualización. El marco de trabajo de la misma enlaza con líneas de investigación como las trazadas por grupos como la *Engine Combustion Network (ECN)*, que no abandona el estudio de la combustión convencional principalmente porque existen elementos aún no esclarecidos de los procesos de inyección/combustión que puedan estar aún por ahondar. Y por otra parte, también pretende proveer nuevas herramientas para los entendimientos de procesos de inyección/combustión. Lo cual viene a ser punto destacado dentro del presente trabajo.

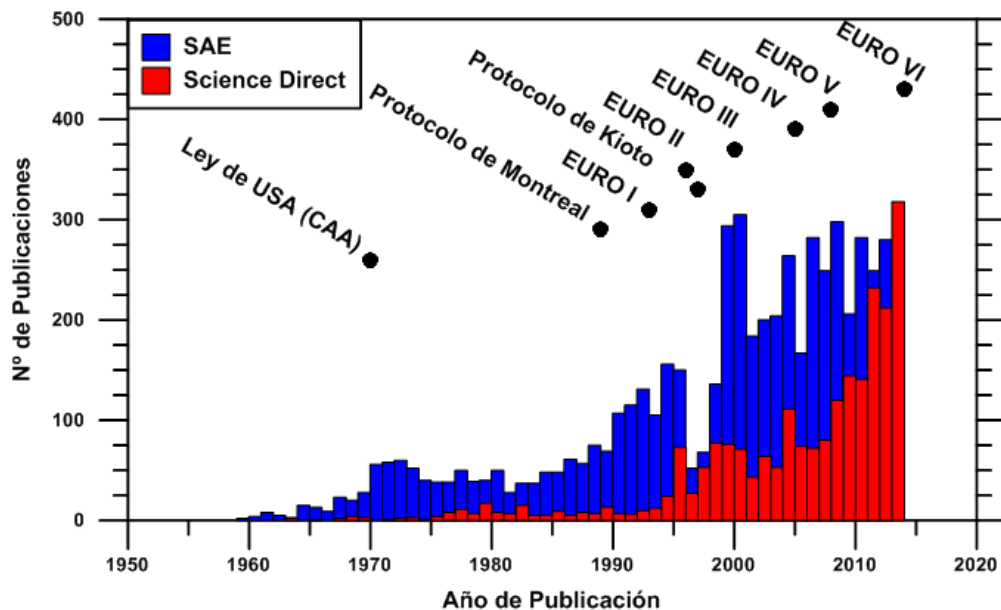


Figura 1.2.- Históricos de número de publicaciones relacionadas con procesos de mezcla Diesel y emisiones contaminantes. Fuentes: SAE [19] y Science Direct [20].

La actualidad de la investigación en el campo de diagnóstico de combustión incluye el desarrollo de nuevas herramientas que permitan aislar la fenomenología del proceso de combustión de otros fenómenos como el movimiento del aire o del pistón de un motor. En tal sentido, el grupo de trabajo CMT-Motores Térmicos posee una novedosa cámara de combustión la cual proporciona una flexibilidad absoluta a la hora reproducir condiciones típicas de motor en un ambiente cuasi-estacionario. Estas instalaciones, junto con los nuevos equipos de visualización a alta velocidad permiten obtener una gran cantidad de información sobre aspectos de la evolución de la llama Diesel no tratados en la literatura.

La tesis parte del conocimiento adquirido a través de trabajos previos como las tesis doctorales de García [21], Zapata [22], Nerva [23] y Bardi [24] en donde se pueden encontrar razonamientos ligados a los procesos de inyección/combustión mediante la aplicación de técnicas ópticas y algoritmos de procesamiento digital de imágenes. Trabajos que en conjunto con las observaciones científicas que se recogen en el capítulo 2, establecen el punto de partida de este documento.

1.2 Objetivos del estudio

De lo comentado en la sección anterior, resulta claro que el marco del estudio se engloba en la aplicación de técnicas ópticas para el entendimiento del proceso de combustión de llamas Diesel. Fundamentalmente, *esta tesis pretende cuantificar una serie de parámetros que gobiernan la evolución transitoria de llamas Diesel en condiciones típicas de combustión convencional, así como proveer de herramientas para el análisis del proceso de la formación de hollín y su temperatura en un entorno cuasi-estacionario*. Para ello se enumeran a continuación los objetivos parciales del mismo con que se pretende:

- Definir un entorno experimental idóneo para el diagnóstico de chorros en condiciones reactivas con lo que se permita establecer comparativamente frente a un chorro no-reactivo cuáles son los efectos que la combustión induce en el comportamiento de la penetración de llama.
- Analizar cuál es el efecto de las condiciones de operación de motor sobre la evolución transitoria de la llama Diesel, a partir de un estudio paramétrico de temperatura, densidad del aire, presión de inyección y diámetro de tobera. Con ello, y apoyado en el modelado unidimensional de chorros evaporativos, estaremos en condiciones de juzgar sobre cuáles son las características de la evolución transitoria de la llama y que parámetro de mezcla pueden asociarse a su comportamiento.
- Desarrollar, impulsar y actualizar herramientas de visualización del proceso de combustión que permitan afrontar con garantías el análisis de llamas Diesel dando extensibilidad a nuevos procedimientos y/o consideraciones dentro del grupo de trabajo CMT-Motores Térmicos. En concreto, se trabajará en la aplicación de la técnica de schlieren para la visualización del chorro reactivo, y se contribuirá con mejoras en la aplicación de la termometría de dos colores a partir de la medida de radiación de llama.

1.3 Planteamiento del trabajo y contenido del documento

El desarrollo de este documento esta cimentado en una estructura de investigación, que a diferencia de lo que puede ser un estudio incremental, se basa en estudios comparativos para dar respuesta a los temas de investigación definidos

de manera general en la sección anterior. Partiendo de una revisión del proceso de inyección y combustión Diesel, el **capítulo 2** se centra en una descripción de aquellos procesos relevantes para la investigación de esta tesis.

A lo largo del **capítulo 3** se enumeran los materiales, métodos y procedimientos definidos para la consecución de objetivos específicos como la descripción de la evolución transitoria de la llama Diesel. Partiendo de la presentación de las toberas de inyección y su caracterización hidráulica, se describen las dos instalaciones experimentales empleadas en esta tesis, para luego describir dos grupos principales de estudios experimentales y sus condiciones de operación. Uno de ellos, definido dentro del marco de investigación del grupo de *Engine Combustion Network* (ECN) y el otro, un compendio de condiciones de operación noveles de este trabajo.

Posteriormente se presentan las técnicas y magnitudes experimentales para completar los elementos de juicio que darán respuestas a parte de objetivos específicos del estudio. Específicamente, al final del capítulo se aborda un análisis comparativo entre instalaciones en el cual se definirán las condiciones experimentales idóneas para analizar las magnitudes de estudio.

En el **capítulo 4**, en primera instancia se abordará la cuantificación a partir de una imagen schlieren de la longitud de despegue de la llama (lift-off en inglés), que posteriormente se validará con metodologías más estándar a partir de imágenes de radiación. En segunda instancia en el mismo capítulo, se analizará la evolución transitoria de chorros reactivos y no-reactivos con el objetivo específico de dar respuesta a cómo el proceso de combustión influye en su desarrollo, así como de la relación de tal evolución con parámetros de mezcla. El análisis se extenderá a distintas condiciones de operación, con el objetivo de generalizar las conclusiones.

En el **capítulo 5**, se da cuenta de los procesos de formación y oxidación de hollín a través de la termometría de dos colores. Partiendo de una disección de las incertidumbres asociadas a esta medida, se da solución a elementos de carácter experimental y de tratamiento de imágenes de la metodología. Se analizan los resultados del método en un estudio con variaciones paramétricas típicas de motor considerando combustible Diesel convencional, así como un combustible puro, el n-Heptano, con características de autoencendido similares al comercial pero con mucha menor tendencia a la formación de hollín. El estudio se completa con el planteamiento de la relación entre el proceso de mezcla y la cantidad de hollín en llamas cuasi-estacionarias del que se extraen limitaciones y elementos de interpretación para incertidumbres asociadas a la temperatura del hollín estimado mediante la técnica.

Finalmente en el **capítulo 6**, se vierten las principales conclusiones del estudio planteado, resaltando las contribuciones experimentales descritas a lo largo del documento, al igual que las evidencias experimentales que responden a los objetivos planteados para esta tesis. Igualmente, a partir de los puntos más relevantes y también de las incertidumbres encontradas en la investigación se enumeran una serie de trabajos futuros con los que se pueda continuar con la misma.

1.4 Referencias

- [1]. Payri F, Desantes J. M., Motores de combustión interna alternativos. 1era edición Editorial Revertè, 2011.
- [2]. Payri F, Lopez J., Pla B., Graciano Bustamante, D., “Assessing the limits of downsizing in diesel engines”. *SAE Paper* 2014-32-0128, 2014.
- [3]. <http://www3.epa.gov/otaq/consumer/f99017.pdf>
- [4]. http://www.acea.be/uploads/press_releases_files/20151027_PRCV-1509-FINAL.pdf
- [5]. Thompson G., Carder D., Besch M., Thiruvengadam A., et al., “In-use emissions testing of light-duty diesel vehicles in the United States”. *Center for Alternative Fuels, Engines & Emissions West Virginia University*, Final Report, 2014.
http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/WVU_LDDV_in-use_ICCT_Report_Final_may2014.pdf
- [6]. Benajes J., Molina S., García J., “Influence of pre- and post-injection on the performance and pollutant emissions in a HD diesel engine”. *SAE Paper* 2001-01-0526, 2001.
- [7]. O'Connor, J. Musculus M., “In-cylinder mechanisms of soot reduction by close-coupled post-injections as revealed by imaging of soot luminosity and planar laser-induced soot incandescence in a heavy-duty diesel engine”. *SAE Int. J. Engines*, Vol: 7(2), pp. 673-693, 2014.
- [8]. DELPHI. Direct acting light-duty diesel CR system. Tech. rep. *Delphi Automotive*, 2008.
- [9]. Bergthorson J., Thomson M., “A review of the combustion and emissions properties of advanced transportation biofuels and their impact on existing and future engines”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42, pp. 1393-1417, 2015.

- [10].Gargar K., “Contribución al conocimiento del comportamiento del Biodiesel y sus mezclas en motores Diesel actuales y ante futuras tendencias”. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2009.
- [11].Burke R., Brace, C., “The effects of engine thermal conditions on performance, emissions and fuel consumption”. *SAE Paper* 2010-01-0802, 2010.
- [12].Kokjohn, S. L., “Reactivity controlled compression ignition”, PhD Dissertation in Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, 2012.
- [13].Belarte E., “Estudio del proceso de combustión premezclada controlada por la reactividad del combustible en un motor de encendido por compresión”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2015.
- [14].Sjöberg M. Dec, J., “Combined effects of fuel-type and engine speed on intake temperature requirements and completeness of bulk-gas reactions for HCCI combustion”. *SAE Paper* 2003-01-3173, 2003.
- [15].Benajes J., Novella R., García A., Domenech V. et al., “An investigation on mixing and auto-ignition using diesel and gasoline in a direct-injection compression-ignition engine operating in PCCI combustion conditions”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 4(2), pp. 2590-2602, 2011.
- [16].Musculus M., Miles P., Pickett L., “Conceptual models for partially premixed low-temperature diesel combustion”. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 39, pp. 246-283, 2013.
- [17].Benajes J., García A., Domenech V., Durrett R., “An investigation of partially premixed compression ignition combustion using gasoline and spark assistance”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 52(2), pp. 468-477, 2013.
- [18].Novella R. “Estudio de la influencia de los ciclos Atkinson y Miller sobre el proceso de combustión y las emisiones contaminantes en un motor Diesel”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2009.
- [19].<http://www.sae.org/>
- [20].<http://www.sciencedirect.com/>
- [21].García, J. M, “Aportaciones al estudio del proceso de combustión turbulenta de chorros en motores diesel de inyección directa”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2004.

- [22].Zapata D., “Caracterización de los procesos de inyección-combustión diesel mediante visualización y procesado digital de imágenes”. *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2010.
- [23].Nerva J. G., “An assessment of fuel physical and chemical properties in the combustion of a diesel spray”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2013.
- [24].Bardi M., “Partial needle lift and injection rate shape effect on the formation and combustion of the diesel spray”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, 2014.

Capítulo 2

Combustión Diesel y diagnóstico óptico

Contenido

2.1. Introducción.....	14
2.2. Proceso de combustión en chorros Diesel	15
2.3. Formación de mezcla en chorros Diesel	17
2.3.1. Flujo interno en inyectores	17
2.3.2. Atomización y coalescencia.....	20
2.3.3. Evaporación y caracterización macroscópica del proceso de mezcla...	22
2.4. Combustión de chorros Diesel.....	30
2.4.1. Secuencia temporal del autoencendido del chorro Diesel	31
2.4.2. Influencia de las condiciones de operación y de inyección sobre el proceso de autoencendido.....	35
2.4.3. Estructura de la llama de difusión Diesel	37
2.4.4. Evolución transitoria del chorro reactivo.....	48
2.5. Referencias.....	51

2.1. Introducción

Es fascinante para cualquier persona que emprende el camino de la ingeniería y la mecánica como modo de vida entrar a la catedra de motores de cualquier universidad y escuchar las analogías que un catedrático sobre la materia puede hacer para captar la atención de un auditorio. “Hagan una búsqueda rápida de la duración de un chasquido... ¡2 milésimas de segundo! se escucha. Pues bien imagine cuantos giros de cigüeñal trascurren en un motor que gira a 4000 revoluciones en un minuto durante el chasquido...800 giros, 400 ciclos de combustión que incluye apertura y cierre de válvulas, energización de inyectores...fascinante”. En efecto, fascinante como una máquina compleja, llena elementos que en su conjunto y sincronía son capaces de generar trabajo a partir de un proceso controlado de inyección. “Bien, ¿y si observamos cada uno de esos 400 ciclos de combustión? ¿Podemos aprender algo de ello?”.

Probablemente, es una pregunta que décadas atrás surgió en los precursores del diagnóstico óptico de los procesos de inyección y combustión en aras de mejorar el entendimiento del proceso de combustión Diesel, y que hasta la actualidad perdura por la incipiente necesidad de dar un respiro al ecosistema pasando por la reducción del calentamiento global y las emisiones contaminantes que van de la mano de restricciones impuestas por legislación. Es por ello, que en este capítulo se cubren los fundamentos teóricos de la combustión Diesel que obviamente ha de ser enfocada desde el inicio del proceso de inyección hasta la finalización del proceso de combustión. Tal como se afronta en los siguientes apartados, se pretende tal y como en los trabajos de investigación de García [1], Novella [2] y Nerva [3] contextualizar los procesos de la inyección y combustión Diesel en los cuales se encuentra centrada la investigación afrontada en este documento, que de ningún modo abarca la macro-escala del proceso de combustión Diesel bien definida en trabajos de enfoque docente como el de Heywood [4], Arcoumanis et al. [5], Payri et al. [6] entre otros.

En efecto, la definición de las etapas del proceso de mezcla y la descripción de la secuencia temporal hasta el proceso de autoencendido de la misma permitirán encauzar el enfoque experimental de este trabajo de investigación. Que siendo de carácter óptico, se apoya en la descripción conceptual de la llama Diesel para (i) informar al lector cual es el estado del arte en materia de diagnóstico óptico del proceso de inyección/combustión y (ii) puntualizar el campo de investigación que se afronta en el desarrollo de este trabajo a lo largo de los capítulos 3, 4 y 5.

2.2. Proceso de combustión en chorros Diesel

Históricamente y aún en la actualidad, la obtención de la tasa de liberación de calor del combustible (Rate of Heat Release en inglés, RoHR) a partir de la primera ley de la termodinámica tal como en [4],[6], resulta en una herramienta de análisis de cómo ocurre el proceso de combustión. A través de este parámetro cuantificador de la energía liberada desde el combustible, es posible la definición temporal del evento de combustión mediante la correlación con el evento de inyección dando lugar a la definición de las fases de combustión Diesel [2].

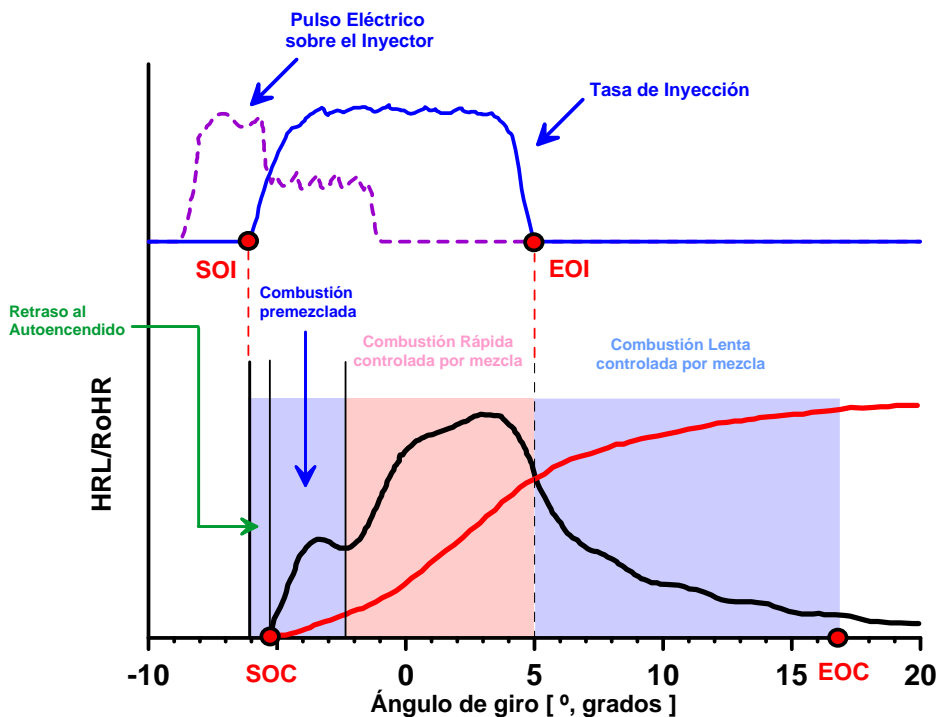


Figura 2.1.- Definición de fases del proceso de combustión Diesel en comparación con un evento de inyección, adaptada del trabajo de Novella [2].

Retraso al autoencendido (ID): Tal como se muestra en la *Figura 2.1*, esta etapa transcurre en el periodo entre el inicio de inyección (Start of Injection en inglés, SOI) y el inicio del proceso de combustión (Start of Combustión en inglés, SOC), siendo más tangible si se relaciona entre el instante donde la primera gota de combustible líquido asoma por la punta de la tobera de inyección y el instante donde la tasa de liberación de calor crece sustancialmente. Considerándose que dentro de esta ventana temporal, el combustible inyectado no libera calor y da lugar

a procesos de carácter fluido dinámicos posteriormente enumerados en la sección 2.3. La tasa de mezcla gas/combustible es controlada por el flujo de cantidad de movimiento sustentada por el diferencial de presión de inyección y el gas dentro de la cámara de combustión. Bajo una cadena de procesos netamente físicos se crea un chorro a partir de la atomización del combustible, el englobamiento del gas y la vaporización de la mezcla como consecuencia del ambiente de alta temperatura dentro de la cámara de combustión; etapas que posteriormente serán descritas en la sección 2.4. Si es aire el gas englobado por el combustible, la mezcla se torna muy inestable como consecuencia de las diferentes pre-reacciones químicas de baja intensidad que ocurren. La consecuencia no es más que la disociación de las moléculas de combustible en cadenas de carbono más simples y la formación de radicales libres. Como resultado, esas pequeñas reacciones inducen al autoencendido espontáneo de la mezcla dando cabida a procesos exotérmicos muy potentes y denotando un aumento considerable de la presión dentro de la cámara de combustión. Lo cual define el inicio de la combustión SOC y un súbito cambio de tendencia en la RoHR (véase *Figura 2.1*).

Combustión premezclada: A continuación de la primera etapa de autoencendido, el núcleo de combustión se propaga a lo largo del combustible que se ha vaporizado previo al inicio de la combustión (SOC) sin haber alcanzado las condiciones propicias para su propia oxidación. Característicamente, durante la combustión premezclada la liberación de energía es muy alta y ocurre en un espacio temporal relativamente corto, alcanzando un pico máximo en la RoHR (véase *Figura 2.1*). Seguidamente, una vez que la tasa de calor liberado alcance un mínimo, es entonces cuando se considera el final del proceso de combustión premezclada.

Combustión controlada por mezcla (Fase rápida): El comienzo de esta fase, se produce justo después del proceso de pre-mezcla. También, a lo largo de esta fase se asume que el calor liberado ocurre a la misma tasa que el combustible se mezcla con el aire [4] y se forma un frente de reacción en la vecindad estequiométrica de la llama conocido como la llama de difusión [7,8]. Esta alcanza condiciones estacionarias tanto en cuanto la duración del proceso de inyección sea lo suficientemente largo, manteniéndose este tipo de estructura hasta el final del proceso de inyección (End of Injection en inglés, EOI)

Combustión controlada por mezcla (Fase lenta): En esta fase, una vez finaliza el proceso de inyección cesan al aporte de masa y momento al proceso de combustión. Por lo tanto, el remanente de mezcla aire/combustible en la cámara de combustión se quema de manera lenta tal como se visualiza en la *Figura 2.1* con el decrecimiento de la tasa de liberación de calor RoHR. A partir del final del proceso de inyección, la estructura cuasi-estacionaria de la llama no es tal por el cese de

aporte de cantidad de movimiento. Recientemente se ha asociado esta fase con un aumento de la tasa de mezcla [1,9], recesión del proceso de combustión [10] y aumento de la oxidación de hollín [11]. Finalmente, la intensidad del proceso de combustión la llama se apaga, dando por finalizado el proceso de combustión

La descripción realizada es bastante global, sin embargo, los entresijos de la evolución de la *Figura 2.1* están estrechamente ligados a procesos locales que transcurren desde: (i) el flujo de combustible a lo largo del sistema de inyección hasta la formación de mezcla, (ii) el autoencendido de la misma, (iii) el progreso de la llama Diesel y (iv) la formación de productos de combustión. Es en este sentido, que a lo largo de las siguientes secciones se da cuenta de la formación de chorros Diesel y de las evidencias experimentales disponibles en la literatura que dan cuenta de entendimiento actual sobre esta materia. Mientras que paralelamente se entrelazan con la descripción y aplicación de técnicas ópticas que han contribuido en su entendimiento.

2.3. Formación de mezcla en chorros Diesel

A lo largo de los años son muchas las contribuciones al entendimiento de la combustión Diesel. Históricamente, siempre ha existido una incipiente relación entre la historia del proceso de inyección y combustión Diesel. La variabilidad de las condiciones de contorno, en este caso la tobera y sus componentes, así como las condiciones termodinámicas en el cilindro impactan sobre el devenir de ambos procesos. Más allá del simple hecho de un combustible que es conducido por medio de alta presión desde el sistema de inyección, existen fenómenos en este tránsito que son propicios de mencionar. No porque el enfoque de este trabajo sea tal, sino porque la contextualización de la fenomenología del proceso puede aportar elementos de juicio en cuanto a los resultados noveles de este trabajo.

2.3.1. Flujo interno en inyectores

Cuán importante es el flujo interno sobre el proceso de inyección/combustión Diesel está estrechamente ligado con el carácter transitorio y con la escala temporal ciertamente reducida en la que deben ocurrir todos los procesos físicos previos a los dominados por la combustión. En la literatura existen gran variedad de estudios que basan su análisis en la eficiencia del proceso de inyección frente a un proceso teóricamente desarrollado a partir de la ley de Bernoulli (Ecuación 2.1). Trabajos como el de Gimeno [12] focaliza como causas de la pérdida de eficiencia del proceso de inyección a la fricción del combustible, y

también al fenómeno de la cavitación ampliamente estudiado por Payri [13], Salvador [14], entre otros. De hecho, es la cavitación un fenómeno que en la actualidad del motor Diesel toma cada vez mayor relevancia en las aplicaciones de vehículo de pasajero. Las estrategias actuales de reducción del tamaño de motores afectan al diámetro de las toberas de inyección, que por sus características constructivas tienen mayor propensión a la cavitación con diámetros de tobera muy pequeños [6].

Partiendo desde un análisis teórico como el propuesto por Gimeno [12], el viaje del combustible a través de la tobera de inyección que contempla en su estudio, toberas de diámetros 112-138-156 μm y una presión de inyección entre 30-80-130-150-200 MPa. En su análisis Gimeno liga la caída de presión a lo largo de la longitud del orificio de salida de la tobera a una velocidad de descarga a través de la ley Bernoulli (Ecuación 2.1). En consecuencia, son la tasa de combustible inyectado (\dot{m}_f) y la cantidad de combustible imprimida al mismo (\dot{M}_f) las variables de interés para la descripción del flujo interno en toberas en el análisis arrojado por el autor. Experimentalmente, en la literatura [12,15] se encuentran metodologías y procedimientos para la obtención de tales medidas. Del análisis, existen parámetros que dan cuenta de las características del flujo. Así, el coeficiente de descarga (C_d), define la eficiencia de descarga de la tobera respecto a una de características ideales. Dicho parámetro es el producto de otros dos, el coeficiente de área (C_a) y el coeficiente de velocidad (C_v), que dan cuenta de la restricción de la sección de paso del combustible (elemento de evaluación de la cavitación) o de la disminución de la velocidad de inyección como consecuencia de las fricciones a lo largo del orificio de salida, respectivamente.

$$U_o = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{iny} - P_0)}{\rho_f}} \quad (2.1)$$

Incluso en este contexto, las técnicas ópticas se han empleado a la hora de contrastar las propiedades del flujo interno en toberas que se vierte de un análisis de la dinámica de fluidos. Específicamente, la cavitación es el fenómeno enfocado desde el punto de vista óptico. Y es que la cavitación es un proceso en el que por una caída de la presión del líquido por debajo de a la presión de saturación del mismo instaura el cambio de fase [16], en el caso de tobera de inyección en zonas aledañas al cambio de sección donde la formación de burbujas de combustible evaporado son propensas a formarse. La formación de estas burbujas asociado el efecto óptico de refracción, dan validez a la aplicación de técnicas como el efecto schlieren/shadowgraph [17] para contrastar experimentalmente el fenómeno. En la

Figura 2.2, se presentan imágenes de los trabajos de Payri et al. [18] y Blessing et al. [19], donde el fenómeno de cavitación en toberas Diesel a través del análisis de los coeficientes de descarga y de la geometría del mismo han sido corroborados por la aplicación de técnicas ópticas. En el trabajo de Payri et al. [18], incluso se relaciona el efecto de cavitación a las propiedades físicas del combustible, en lo que la viscosidad cinemática del mismo y por ende de un régimen de Reynolds muy superior al Diesel comercial resulta en un proceso de inyección cada vez más propenso a la cavitación.

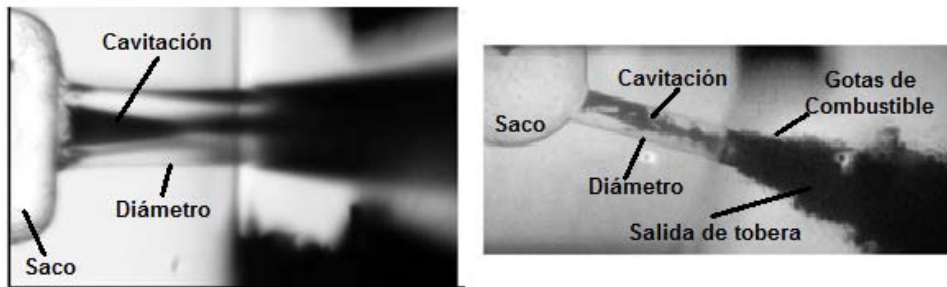


Figura 2.2.- Flujo interno en toberas transparentes. Visualización del efecto de cavitación en toberas de inyección directa. Izquierda: Imagen adaptada de [18], iluminación difusa del flujo interno en tobera transparente ($d_0= 510 \mu\text{m}$; $\sqrt{\Delta P} = 2.17\sqrt{\text{MPa}}$). Derecha: Imagen adaptada de [19], shadowgraph del flujo interno en tobera cónica ($d_0= 200 \mu\text{m}$; $P_{\text{iny}}= 800 \text{ bar}$).

Dejando de lado el proceso de cavitación a un lado, existen trabajos como el de Bracho [20], en el que la medida de tasa de combustible define una dependencia respecto a la velocidad del sonido utilizada según los procedimientos descritos en [12]. En ese sentido, la dependencia de la velocidad del sonido se ha relacionado de manera directa en primera instancia al combustible empleado, y en segunda instancia a la presión y temperatura a la cual es sometido durante el proceso de inyección como una función polinómica que relaciona ambos parámetros. Resultando en medidas de la tasa de combustible que pueda variar hasta en un 20% en combustibles sintéticos (véase [20] en relación a los combustibles empleados) respecto de un análisis en el que se utiliza la velocidad del sonido de un combustible convencional. Mientras que trabajos como el de Payri et al. [21] han identificado lo propenso de un sistema de inyección con tasa variable a tal, debido a un mayor coeficiente de restricción de área C_a .

También muchos son los esfuerzos en conocer cuáles son los efectos de determinadas condiciones de contorno de interés, incluyendo condiciones de baja temperatura (arranque en frío) y el efecto de las propiedades del combustible, sobre

el desarrollo del flujo interno y en la formación de la mezcla [3,18,20]. El sentido de tal investigación, puede estar relacionado con la puesta a punto de modelos complejos CFD [22,23] que buscan mimetizar la realidad del proceso de inyección, no solo en la escala macroscópica sino también en la microscópica, ya que está probada la relación del régimen de flujo interno (flujo cavitante o no cavitante) sobre el proceso de inyección. En lo que se refiere a estos procesos, si bien es ingente la cantidad de información relativa en la literatura, la información señalada en los párrafos anteriores da un contexto general de procesos ligados a la combustión Diesel, la cual es el enfoque primario de esta investigación.

2.3.2. Atomización y coalescencia

Es una obviedad la importancia fundamental de la formación de mezcla en chorros de inyección directa en motores Diesel, que posteriormente repercute en la combustión y formación de contaminantes como el hollín, como define Tree [24] en su investigación. Incluso su entendimiento contribuye a la aplicabilidad de nuevas estrategias de inyección [2], como por ejemplo la pre y post-inyecciones, en aras de limitar o reducir los contaminantes formado en la cámara de combustión de un motor Diesel [25-27].

El chorro Diesel resulta de una estructura compleja referida a una escala especial que va desde la punta de la tobera hasta el final del flujo disperso del mismo. Tal como se define en la *Figura 2.3*, los primeros milímetros de la misma se definen como la vena líquida de combustible [1-4] cuya dimensión depende de manera fundamental de la presión de inyección. La interacción en la vecindad del núcleo líquido con el aire en conjunto con perturbaciones originadas por el propio flujo turbulento causa la separación estructuras de combustible líquido de la vena líquida (véase *Figura 2.3*). Este proceso define lo que se conoce como proceso de atomización primaria (esquematizada en la *Figura 2.3*). Una vez separados, estos paquetes de combustibles interaccionan en mayor proporción con el aire de sus alrededores, lo cual origina nuevas inestabilidades que a su vez inducen la ruptura de estos paquetes de combustibles en gotas de menor tamaño, proceso conocido como atomización secundaria. Este proceso perdura en la nube de combustible hasta que la tensión superficial de los pequeños paquetes de combustible son capaces de compensar las fuerzas a las cuales se ven sometidas sin inducir ruptura alguna.

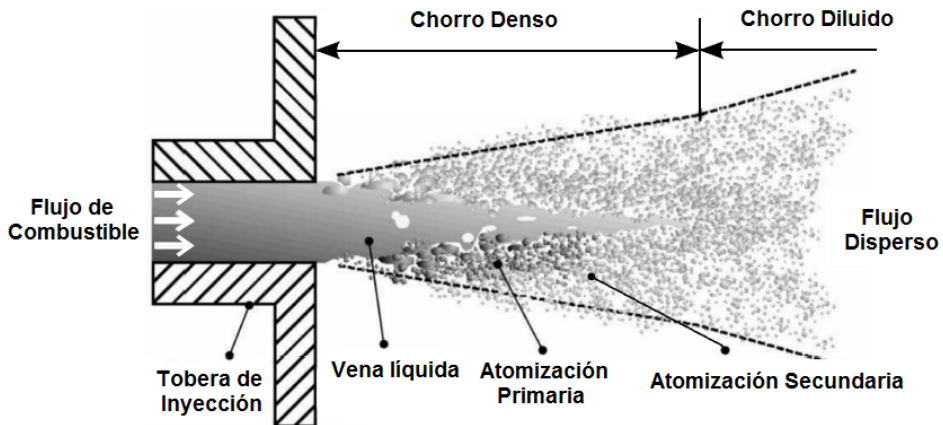


Figura 2.3.- Esquema de la estructura del chorro Diesel

De acuerdo con las técnicas experimentales que pueden ser aplicadas en la investigación de chorros densos como el de la figura, suelen clasificarse las regiones del chorro en zona densa y diluida del mismo. La primera, también llamada zona de chorro cercano, como su nombre indica está relacionada al área más próxima a la tobera e incluye tanto la vena líquida como la zona de atomización primaria. Dado que esta zona es ópticamente muy densa para la aplicación de técnicas ópticas convencionales, la aproximación suele hacerse mediante técnicas de Rayos-X [28-30] o imágenes microscópicas de alta velocidad [31]. La segunda zona, también llama zona diluida, está relacionada con la zona donde el proceso de atomización es completo y característicamente el chorro es menos denso ópticamente. Lo cual permite la aplicación de técnicas ópticas experimentales más simples y de uso convencional en la caracterización de chorros Diesel [32,33].

En relación con la atomización, la literatura relaciona el régimen de atomización con los límites fijados por el número de Reynolds y de Ohnesorge [34,35]. Ello implica la influencia de parámetros de inyección y del combustible como la viscosidad, densidad, tensión superficial, diámetro efectivo del orificio y la velocidad de inyección [3]. Trabajos como el de Arrége et al. [36] apunta a que en chorros de inyección Diesel convencional se puede considerar que existe un proceso de atomización completa, dando significado a la definición finita de la máxima longitud de la vena líquida en la *Figura 2.3*, a lo cual sucede un régimen donde el núcleo líquido desaparece. Recientemente, esta evidencia se ha contrastado en trabajos como el de Pickett et al. [37] y Desantes et al. [38], donde la microscopia óptica es la técnica empleada. Incluso en el trabajo de Desantes,

existe una relación entre la observación de un régimen de atomización completa con el efecto de cavitación en la tobera usada, bajo lo que los autores presumen es un incremento del ancho del chorro y una mejora de la mezcla aire/combustible. No obstante el tamaño de las gotas y su relación con el efecto de cavitación se mantiene incierto a pesar del estudio a través de medidas del diámetro de Sauter [36,39], donde se ha evidenciado un menor tamaño de gotas como consecuencia de: un menor diámetro de tobera, aumento de la presión de inyección y mayor densidad del aire [40].

2.3.3. Evaporación y caracterización macroscópica del proceso de mezcla

Hasta el momento, el combustible totalmente atomizado en gotas de pequeño tamaño transita por un proceso de interacción con las moléculas de aire del ambiente. Tal interacción provoca un intercambio térmico que origina un cambio de fase en la hasta el punto de la evaporación completa. Muchos son los autores que describen el proceso de evaporación como controlado mezcla [4,5,6,37], es decir, tanto en cuanto la tasa de englobamiento aire-combustible se modifique, se trasladará dicho efecto sobre la tasa de evaporación del combustible. Como consecuencia de ello, la evaporación viene definida por un dosado característico, dependiente de las condiciones ambiente y las propiedades del combustible, tal que cuando la mezcla lo alcance se produce la evaporación total. En tal sentido, a continuación se afronta la definición de este proceso, con las características singulares del mismo, al igual que las evidencias experimentales que conllevan en gran medida a la compresión y caracterización macroscópica del chorro.

Longitud líquida máxima

Después del inicio de inyección el combustible en fase líquida alcanza una longitud máxima que suele ser cuasi-constante en sintonía con un proceso de inyección cuasi-estacionario tal como se muestra en la *Figura 2.4*. La longitud líquida máxima es por ende un elemento definitorio del proceso de evaporación y mezcla, razón por la cual se ha estudiado con detalle su modificación al cambiar las condiciones ambientales y de inyección en la literatura [41,42]. La aplicación de técnicas como la visualización mediante Mie-scattering o la Iluminación Trasera Difusa concentran el mayor número de investigaciones en relación con este parámetro.

Desde finales del siglo pasado hasta el presente siguen aportándose nuevas visiones sobre el proceso de evaporación en chorro Diesel de inyección directa.

Trabajos como el de Spey y Dec [43] han proporcionado una visión directa del efecto de la variación paramétrica de la densidad y temperatura del aire en la cámara de combustión sobre el proceso de penetración del combustible líquido. De estos otros trabajos [41,42,44,45] se concluye que la reducción de la longitud líquida está relacionada con una mayor densidad o temperatura del aire. En el caso de la densidad de aire, la tasa de mezcla aumenta y la evaporación completa ocurre en una escala temporal/espacial menor. En el caso de la temperatura del aire, el efecto observado se justifica porque en una atmósfera más caliente se aceleran los procesos de intercambio térmico entre el combustible y el aire, y la escala temporal/espacial de evaporación también se reduce. Aunque mayoritariamente los resultados encontrados en la literatura, se refieren a evaluaciones en ambientes cuasi-estacionarios generados en cámaras de combustión de presión constante, trabajos como el de Fisher et al. [46], realizados en un motor óptico, analizan el histórico de las condiciones ambientales inducido por el movimiento del pistón sobre la variación de longitud líquida máxima, coincidiendo con el análisis de Nerva [3].

Del lado de parámetros definitorios del proceso de inyección, la reducción del diámetro de tobera [41] está relacionada con una disminución de la masa de combustible inyectado por orificio, que en iso-condiciones ambientales resulta en una longitud líquida más corta. Por su parte, la variación de la presión de inyección parece no tener efecto alguno sobre la longitud máxima [3,41,44] ya que tal como han concluido estos autores, un aumento de la tasa de momento y combustible inyectado aumenta el englobamiento de aire a expensas de mantener la misma tasa de mezcla. Esto último está relacionado con la hipótesis expuesta anteriormente del control por mezcla de la evaporación Diesel.

Por otro lado, la volatilidad del combustible impacta linealmente en la longitud máxima tal como se ha definido en [47]. El incremento de la temperatura media de evaporación de un combustible real ($T_{50\%}$) aumenta la longitud máxima, observación que ha sido contrastada a lo largo de los años tanto para combustibles sintéticos de sustitución. Incluso trabajos como el de Kook y Pickett [48] o Nerva [3], han puesto sus esfuerzos en relacionar propiedades físicas del combustible con la longitud líquida máxima, resultando según modelos empíricos desarrollados por este último autor en que la longitud máxima se escala con la densidad del combustible en un factor $\rho_f^{4,39}$.

Referido a la “forma” cuasi-estacionaria del proceso de inyección, el dosado de evaporación permanece invariable durante la inyección tal como han observado Pickett et al. en su trabajo [49]. Aunque estudios como el de Musculus y Katke [50] enfocados en el proceso transitorio del final de inyección han podido

establecer que existe un incremento en la tasa de mezcla durante el cierre de la tobera de inyección que reduce la longitud líquida máxima, respecto de su valor cuasi-estacionario. Efecto que se ve potenciado cuando mayor sea la velocidad de cierre del inyector, mayor diámetro de tobera y sin efecto aparente del tipo de combustible usado. Por otra parte, en trabajos como el de Payri et al. [21], la aplicación de tasas de variables durante el mismo evento de inyección, resulta en una variabilidad de la longitud líquida entre orificios de toberas comerciales. Que presumiblemente resulta de una mayor propensión a la cavitación mayor en los orificios con longitud líquida más corta, observación que es recurrente en visualización de toberas multi-orificios [51].

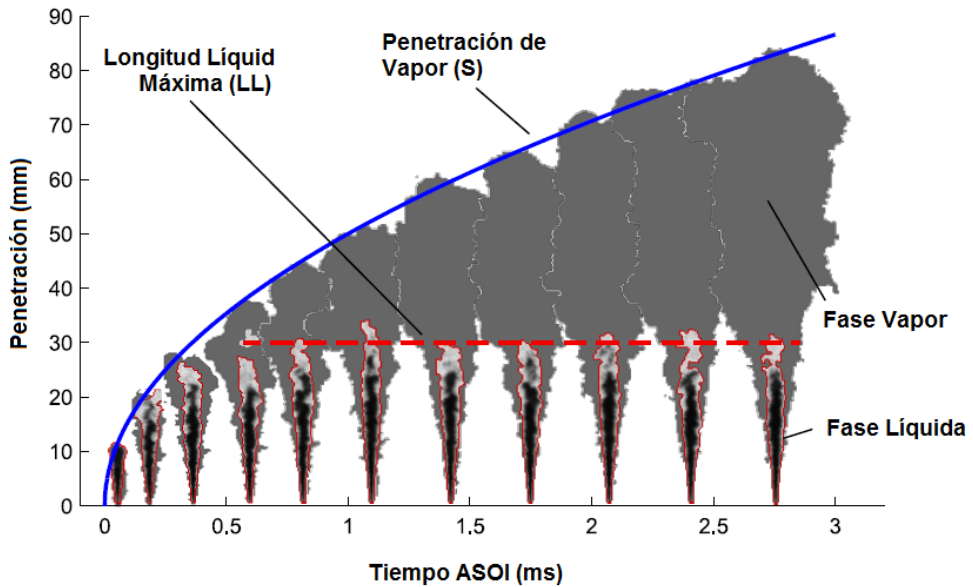


Figura 2.4.- Evolución temporal de la fase líquida y vapor de chorro Diesel no-reactivo desarrollado en ambiente de presión y temperatura cuasi-estacionario [52].

La hipótesis de un proceso de evaporación controlada por mezcla más allá de la evidencia experimental está soportada de forma teórica mediante desarrollos como el presentado por Siebers [53], que han permitido la obtención de herramientas ampliamente adoptadas para el entendimiento de los procesos cuasi-estacionarios de longitud líquida. En este sentido, el autor sintetiza la estimación de la longitud líquida máxima a través de la ecuación 2.2. La intención del autor, no era más comprender los efectos de parámetros como el diámetro de tobera y condiciones de la cámara de combustión a través de la definición parámetros de características:

- (i) De evaporación, como B en la ecuación 2.2, que representa el dosado característico de evaporación, en función de la presión ambiente (P_a) y temperatura del ambiente (T_a), así como también la temperatura del combustible (T_f) y las propiedades del combustible.
- (ii) De inyección, como el coeficiente de área C_a de la tobera de inyección.
- (iii) De mezcla, como el diámetro equivalente d_{eq} de la ecuación 2.3 que relaciona la geometría de la tobera con el ratio de densidades entre el combustible y el ambiente.
- (iv) De escalado, como las constantes a y b provenientes de estudios paramétricos realizados por el autor.
- (v) De geometría del chorro Diesel, a través del ángulo de chorro θ .

$$LL = \frac{b}{a} \cdot \sqrt{C_a} \cdot \frac{d_{eq}}{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \sqrt{\left(\frac{2}{B(T_a, P_a, T_f)} + 1\right)^2 - 1} \quad (2.2)$$

$$d_{eq} = d_o \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_a}} \quad (2.3)$$

Un paso más allá han dado autores como Pastor et al. [54] o Musculus y Katke [50], en relación con el modelado de la longitud líquida máxima al introducir modelos basados también en hipótesis idénticas, pero que permiten el seguimiento del proceso transitorio, es decir, con resolución temporal del proceso de inyección. Así como también modelos simplificados que muestran un potencial al menos similar al modelo de Siebers [53], con el valor añadido de la determinación temporal y local de dosado de mezcla lo cual ha servido para el entendimiento de procesos de mezcla en condiciones particulares como la combustión de baja temperatura [55] y la utilización de inyección directa de gasolina [56].

Penetración en chorros Diesel

Desde el terreno del diagnóstico muchos son los aportes vertidos en relación al entendimiento de cómo evoluciona temporalmente la mezcla aire combustible en fase vapor, y es con la aparición de la visualización de alta velocidad que muchos trabajos son reveladores de cómo transcurre el proceso. Frente a la aplicación de técnicas de visualización como Rayleigh scattering [57-59], que requiere una puesta a punto incluyendo: (i) un láser de baja frecuencia (ii) cámara de baja frecuencia (iii) elementos ópticos de filtrado y (iv) una gran campaña de ensayos para dar resolución temporal de la penetración, las técnicas como el shadowgraph/schlieren [60-63] con un sistema de iluminación y cámaras de alta velocidad, han reducido la inversión de tiempo de ensayo maximizando la información derivada de estudios de chorros Diesel.

Aunque la descripción hasta ahora vertida en párrafos anteriores puede llevar a interpretar un hilo temporal en cuanto atomización, evaporación y luego la penetración de la fase vapor, desde el inicio de la inyección de combustible se puede observar la fase vapor. Estudios como el de Bardi [52] del que se extrae la *Figura 2.4* describen desde el comienzo de la atomización un núcleo de mezcla en fase vapor envuelve el combustible líquido, por lo que la dualidad de fases está presente en el chorro hasta alcanzar la evaporación completa del combustible. Mientras dure el proceso de inyección, el aporte de masa y momento desde la tobera de inyección induce al progreso del vapor de combustible aguas abajo de la longitud máxima líquida, tal como se aprecia en la *Figura 2.4*.

La relación del proceso de penetración de vapor y los efectos de las condiciones de motor han sido ampliamente estudiadas a lo largo de la últimas dos décadas del siglo anterior en trabajos como los de Hiroyasu y Harai. [64,65], Dent [66], entre otros [67,68]. Por su parte, Naber y Siebers [60] han desarrollado un estudio completo sobre las características de un chorro inyectado en condiciones Diesel. Mediante la aplicación de schlieren, su análisis parte de los efectos de la evaporación del combustible frente a un chorro isoterma con una inyección cuasi-estacionaria variando (i) Densidad y temperatura del ambiente, (ii) presión de inyección y (iii) diámetro de tobera. Sus observaciones incluyen que el efecto de evaporación del combustible disminuye o ralentiza el proceso de mezcla, condición más notoria en condiciones de baja densidad (variada entre 3.6 y 58.6 kg/m³ en [60]) en hasta un 20%. El efecto de la temperatura del aire sobre la penetración es nulo según sus observaciones y los autores sugieren su eliminación de cualquier relación de la penetración con parámetros característicos de motor distintos a la densidad del aire. Mientras que la disminución de la presión de inyección o el diámetro de tobera fomenta una mayor tasa de englobamiento de aire en isocondiciones de densidad, siendo este análisis coherente con una menor penetración del chorro Diesel.

La contribución de Naber y Siebers [60] permanece aún hasta la fecha presentes en el análisis de la penetración de chorros Diesel. En tal sentido, los autores mediante el uso del diámetro equivalente (d_{eq} en la ecuación 2.3), han introducido escalas adimensionales que dan cuenta del fenómeno de penetración de acuerdo a las ecuaciones 2.4 y 2.5, donde las escalas x^+ y t^+ están relacionadas con el diámetro equivalente, un valor de carácter empírico $a=0.66$, el ángulo de chorro y en el caso de t^+ , con la velocidad teórica de Bernoulli a la salida de la tobera. Trabajos como los de Gimeno [12] y Bardi [52] evocan tales relaciones para dar robustez a las evidencias experimentales y sus relaciones empíricas de las ecuaciones 2.6 y 2.7. En el caso del trabajo de Gimeno, tal como se advierte en la *Figura 2.5*, existe una evolución de la penetración dividida en dos zonas, caracterizadas por una pendiente inicial m_i hasta una transición que ocurre en t_r donde inicia la fase “desarrollada” del chorro y se comporta de acuerdo a la pendiente m_p de la *Figura 2.5*, siendo análogo a la evolución descrita en la ecuación 2.7. Por su parte Bardi, relaciona el proceso de inyección también con una correlación que otorga cierto peso al ángulo de chorro, que en las condiciones evaporativas estudiadas por el autor tiene relativa influencia sobre la penetración del chorro.

$$x^+ = \frac{d_{eq}}{a \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (2.4)$$

$$t^+ = \frac{d_{eq}}{a \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot U_0} \quad (2.5)$$

$$S = 2.013 \left(\frac{\rho_a}{\rho_f}\right)^{0.1137} \cdot C_a^{3.344} \cdot \rho_a^{-0.25} \cdot \dot{M}^{0.25} \cdot t^{0.5} \quad (2.6)$$

$$S = k \cdot (C_a \cdot d_0)^{0.5} \cdot \rho_a^{-0.31} \cdot \dot{M}^{0.248} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)^{0.0076} \cdot t^{0.5} \quad (2.7)$$

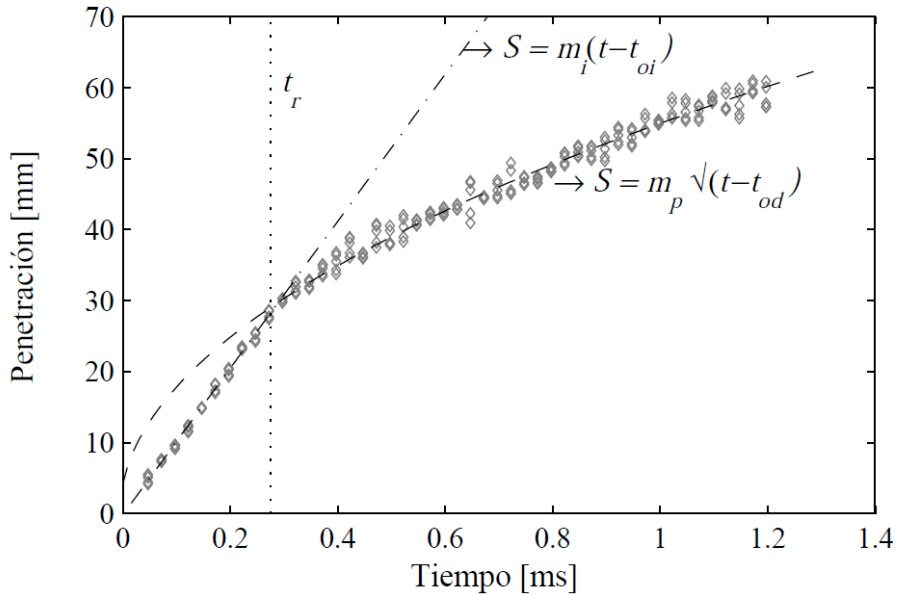


Figura 2.5.- Parametrización temporal de penetración de chorro isoterma en [12] ($d_o=156 \mu\text{m}$, $P_{iny}=30 \text{ MPa}$, $\rho_{aire}=15.5 \text{ kg/m}^3$). El tiempo t_{oi} , es relativo al origen de la inyección (evaluado por el autor). El tiempo t_{od} es relativo al origen de la penetración desarrollada.

Ángulo de chorro Diesel

A partir de una básica representación, el ángulo que envuelve el chorro Diesel se puede definir como el que define un cono ajustado al contorno del chorros Diesel evaporativos no reactivos como los mostrados en la **Figura 2.4** o definiciones alternativas como la de Naber y Siebers [60]. La implicación del ángulo de chorro va desde su determinación, hasta su relación con parámetros macroscópicos del chorro como la longitud líquida (ver ecuación 2.2) y la penetración (ver ecuación 2.7), ya que su determinación está relacionada con la variabilidad de ambas medidas en [42,52,60]. Su caracterización ha estado sujeta a discusión bien por su definición o por su relación con parámetros de inyección y termodinámicos del ambiente en la cámara de combustión. En el estudio del chorro cercano, Desantes et al. [38] han observado un aumento del ángulo del chorro como consecuencia de la cavitación asociado a un mayor englobamiento de aire en el chorro. Por otra parte, la geometría de la tobera puede influenciar el valor absoluto de la medida, aunque ninguna tendencia es clara al respecto. También, se ha observado una tendencia a un ángulo de chorro menor en consecuencia del aumento de la temperatura del aire en la cámara de combustión [52].

La medida del ángulo no es unívoca, y suele depender de la técnica óptica empleada para su cuantificación. En este sentido Pickett et al. [49], apuntan al efecto que tiene la densidad del aire en la cámara de combustión sobre el índice de refracción de la misma y su relación con las medidas con técnicas como shadowgraph/schlieren. Sus resultados muestran que la estimación del ángulo de chorro en un sistema schlieren es muy sensible cuando simula la penetración experimental de chorros no reactivos a partir del modelos como el de Musculus y Katke [50]. No obstante, partiendo de sistemas schlieren como el recomendado por Pickett et al. [49], Pastor et al. [45] realizan un análisis de la penetración predicha por un modelo 1D de chorro, y han determinado que la mejor aproximación a la penetración experimental se obtiene bajo la consideración del ángulo de chorro como una variable más del modelo usado, ya que el valor de ángulo experimental sub-predice la penetración. Los trabajos anteriores están realizados de forma óptima en un ambiente con aire en reposo, mientras que en el caso con movimiento del aire en máquinas de compresión rápida o motores ópticos dificultan la medida robusta de este parámetro tal como se ha reportado en [51,69].

Recientemente Jung et al. [70] en su trabajo han enfocado su estudio en chorros cercanos alrededor de 3 mm de distancia respecto al orificio en condiciones ambientales propias de las definidas en [71], con densidad y temperatura del ambiente de 22.8 kg/m^3 y 440 K, respectivamente. Sus observaciones a través de iluminación trasera difusa, muestran las diferentes etapas del ángulo de: en una etapa inicial el ángulo de chorro crece hasta alcanzar un máximo en la fase inicial. Posteriormente en la fase cuasi-estacionaria tiende a un valor constante, hasta alcanzar el final de inyección en la que el ángulo aumenta tal como se observa en la *Figura 2.6*. Esta observación final, puede estar relacionada también con las observaciones vertidas en escalas macroscópicas, ya que un aumento de la tasa de mezcla cerca del final de inyección encontradas por Musculus y Katke [50] en condiciones de combustión a baja temperatura presumiblemente causa un ensanchamiento del chorro. Jung et al. [70] en su trabajo, también han relacionado la condición de un ángulo de chorro que disminuye en la fase cuasi-estacionaria con una penetración del chorro que tiende acelerarse durante esta etapa, en medidas de penetración obtenidas a través de visualización schlieren.

En relación con lo anteriormente descrito, el ángulo de chorro tiene efectos de mezcla tangibles en la literatura, con gran incertidumbre en cuanto a su medida en condiciones evaporativa sin presencia de combustión. En condiciones reactivas, no existe información relativa a esta medida, ya que la característica cónica del chorro pierde validez si atendemos a la morfología de la llama Diesel que sufre una expansión radial en la zona reactiva de la llama. Aunque cronológicamente no es

correcto tal planteamiento, más adelante en este capítulo se retomará la condición de ángulo reactivo para contextualizar parte del trabajo vertido en este documento.

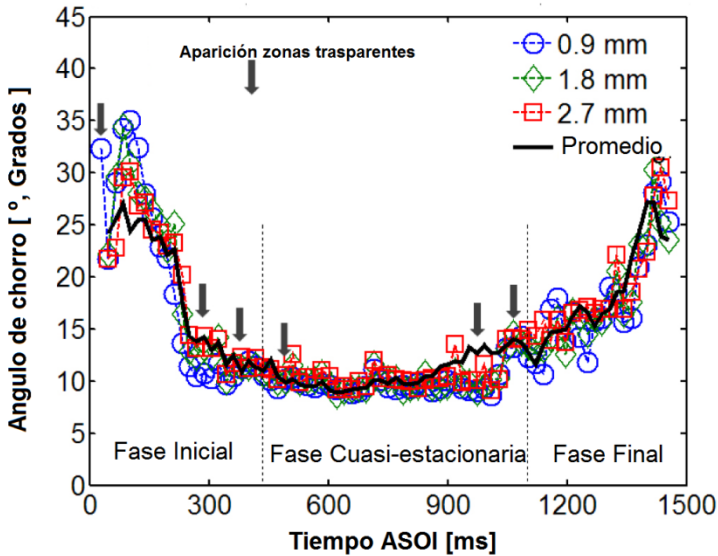


Figura 2.6.- Evolución temporal del ángulo de chorro en condición de Spray B adaptado de [70]. ($d_o = 90 \mu\text{m}$, $P_{\text{iny}} = 150 \text{ MPa}$; $\rho_{\text{aire}} = 22.8 \text{ kg/m}^3$; $T_{\text{aire}} = 440 \text{ K}$). Símbolos indican la distancia a la cual el autor ha ajustado el ángulo de chorro minimizando el error cuadrático medio (ECM).

2.4. Combustión de chorros Diesel

Durante el evento de inyección y en convivencia con los procesos de atomización, mezcla y evaporación completa del combustible líquido, la mezcla aire/combustible entra en una fase de desarrollo del chorro que bajo las condiciones apropiadas fomenta el autoencendido de la mezcla para generar trabajo. La descripción realizada en el apartado anterior carece de elementos de entendimiento de cómo suceden las reacciones exotérmicas y la subsecuente liberación de calor, además de procesos inherentes a la combustión Diesel como lo es la formación de especies y productos de combustión. Así que los procesos desarrollados a partir del autoencendido de mezcla han sido la fuente fundamental para el entendimiento de la combustión y formación de elementos contaminantes en llamas Diesel. Debido a ello, en esta sección se analiza el proceso de combustión de manera detallada a partir de la literatura referente al mismo.

2.4.1. Secuencia temporal del autoencendido del chorro Diesel

Extendida es la descripción de que el autoencendido de chorros Diesel es un proceso que ocurre en dos fases claramente identificadas y análogas a las observadas en estudios de autoencendido en mezclas homogéneas [72-74]. Estos trabajos han sugerido [4,5], que existe una fase en el que se produce reacciones de baja intensidad y baja temperatura que temporalmente ocurre previo a la liberación de calor por combustión premezclada, como se ha definido en la descripción de la *Figura 2.1*, con una tasa nula de liberación de calor (RoHR). No obstante es apreciable una variabilidad de la presión en la cámara de combustión que dificulta la definición de las distintas fases de combustión. Una vez lanzada la combustión, y durante el proceso de oxidación de combustible, la aparición de radicales libres de corta duración que excitados desde su estado de equilibrio, producen quimioluminiscencia.

Múltiples son las fuentes de quimioluminiscencia y múltiples son las longitudes de onda a partir de las cuales se pueden identificar radicales distintivos del estado de la mezcla aire/combustible y de la naturaleza de la reacción del chorro. A partir de estudios en llamas atmosféricas en [75] se han identificado radicales sujetos a quimioluminiscencia en longitudes de onda definidas, radical CH (CH^* , 432 nm), Hidroxilo (OH^* , 306 nm), Carbono (C_2^* , 470-516 nm) y Formaldehído (CH_2O^* , 368-470 nm). Estudios en instalaciones con accesos ópticos en condiciones de motor, han permitido visualizar la coexistencia de estos radicales a lo largo del proceso de combustión así como su evolución temporal. La visualización de estos procesos, muchos de ellos de baja intensidad y en espectros cercanos al UV, requieren el uso de elementos o cámaras intensificadoras de la radiación provenientes de la llama Diesel tal como han investigado en [73,76] para contemporizar temporalmente el desarrollo de la llama con la señal de presión en la cámara de combustión.

En las fases iniciales, previas a la liberación de calor principal, la radiación detectada es de baja intensidad, y proviene mayoritariamente del marcador CH^* , lo que le concede históricamente el sentido de trazador del autoencendido. A partir de la consolidación del proceso de combustión, la intensidad luminosa se incrementa en varios órdenes de magnitud inhabilitando cualquier distinción de trazadores de autoencendido, ya que la emisión de luz es dominada por la luminosidad de amplio espectro del hollín, el cual ha aparecido durante posteriormente el autoencendido.

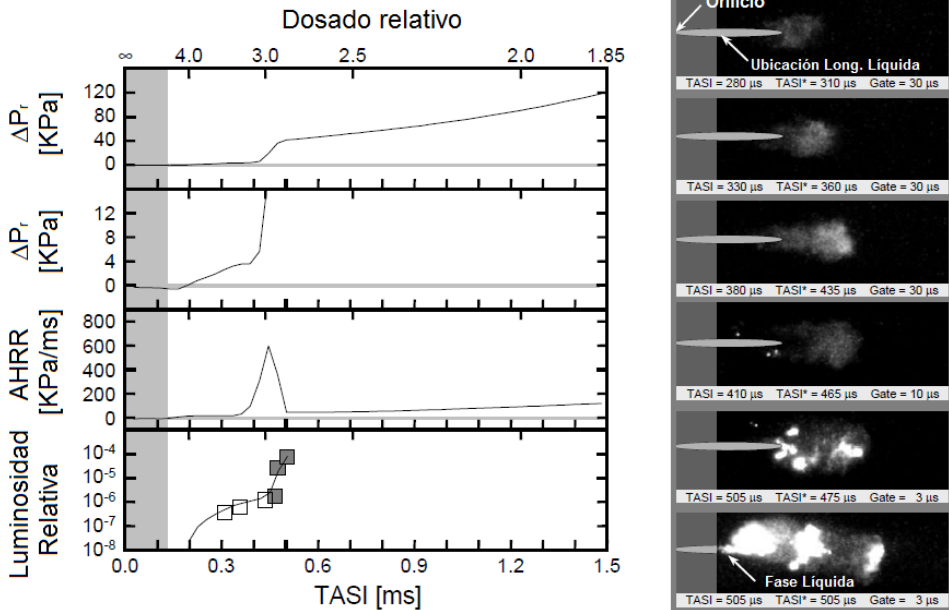


Figura 2.7.-Figuras adaptadas de Higgins et al. [74]. Izquierda: Incremento temporal de la presión (ΔP), liberación de calor aparente (AHRR) y luminiscencia relativa durante el proceso de autoencendido de un chorro Diesel en una cámara de combustión de volumen constante. Derecha: Imágenes de amplio espectro de la secuencia de autoencendido (sin filtrar). Condiciones ambiente: 14.8 kg/m^3 , 1000 K y $21\% \text{ O}_2$.

En relación de los procesos derivados del autoencendido comentados anteriormente Higgins et al. [74] han definido tres fases sucesivas que describen el proceso según lo mostrado en su estudio y adaptado en la **Figura 2.7**. En dicha figura se presentan en la parte izquierda la evolución temporal de la presión dentro de la cámara de combustión, así como también de la luminiscencia acumulada de la llama. En la parte derecha se muestran imágenes de instantes singulares del proceso de inyección/combustión obtenidas en las condiciones particulares descritas en el título de la figura. Sus resultados definen las tres fases descritas como:

Fase de inducción física: Es la fase que se extiende desde el inicio de inyección (0 ms TASI) hasta el inicio de la liberación de calor, temporalmente coincidente con la emisión de quimioluminiscencia de baja intensidad y baja temperatura (0.2 ms TASI). En este espacio temporal ocurre la formación de mezcla tal como se ha comentado en la sección 2.3, incluyen la atomización, englobamiento de aire, mezcla y evaporación que consumen energía. El incremento de temperatura en el chorro continúa hasta alcanzar una temperatura lo suficientemente alta para compensar la

absorción durante la evaporación sumergiéndose en una fase de inestabilidad donde la oxidación se propaga a lo largo de éste. El establecimiento de las reacciones químicas de autoencendido marca el final el periodo de inducción física. Aunque temporalmente finaliza esta etapa, la preparación de mezcla continúa impactando sobre los procesos inmersos dentro las fases donde se desarrollan las reacciones de combustión.

Primera fase de autoencendido: Tal como se ha avanzado esta fase comienza con la aparición y detección de las primeras zonas quimio-luminiscentes y progresa hasta el inicio de la combustión premezclada. . En la *Figura 2.7* se refiere al periodo comprendido entre 0.2-0.4 ms TASI, definido como el autoencendido de baja temperatura [77] o llama fría (cool flame en inglés) [76,77]. Como sugieren Higgins et al. [74] esta primera etapa crece rápidamente en la zona ubicada entre la longitud líquida máxima y la máxima penetración del chorro, al igual que lo observado en [73]. Dominada por una distribución homogénea de la quimioluminiscencia, la química que domina la primera etapa de autoencendido se desarrolla uniformemente a lo largo de esta. En este sentido Kosaka et al. [79,80] han investigado las especies envueltas en el proceso visualizando la población de formaldehído (incluidos los estados no-excitados) mediante técnicas como la *Fluorescencia Inducida por láser* (LIF, acrónimo en inglés). Confirmando la observación de autores como Dec y Spey [73] sobre la presencia de estos durante el autoencendido, desde el final de la liberación de calor aparente negativa (consecuencia absorción y evaporación en el chorro) hasta el inicio de la segunda fase de autoencendido. Es por lo que Dec y Spey ligan la formación de formaldehído al autoencendido de baja temperatura. Mientras que Higgins et al. [74] han estimado que el dosado relativo de mezcla en este fase es rico y varía en el rango de 3 a 4, mientras que la quimioluminiscencia y la liberación de calor cesan justo antes de la segunda etapa del autoencendido (entre 0.3 y 0.45 ms TASI). Si bien no es una etapa en la que se produzca una liberación de calor importante, la gran cantidad de radicales liberados fomentan un aumento súbito en la presión en la cámara de combustión tal como se observa en la *Figura 2.7* y niveles de temperatura de mezcla entre 750-900 K que marcan el final de esta etapa. En tales condiciones, los efectos de ruptura de la molécula de combustible en productos intermedios conllevan a un descenso de la quimioluminiscencia. Incluso con una temperatura de mezcla que aumenta, la tasa de reacción se reduce debido a la modificación de la química del proceso. Higgins et al. [74] atribuyen un aumento de temperatura entre 200-300 °C durante esta fase, atribuyendo dos tercios a la química en la combustión de baja temperatura y el tercio restante al englobamiento de aire caliente por parte

del chorro. En este sentido además de la aplicación de técnicas láser como *LIF*, técnicas como *schlieren* se han adentrado en la descripción de la combustión de baja temperatura. Así, trabajos como el de Pickett et al. [81] han relacionado el inicio de la primera etapa de autoencendido con una súbita desaparición del combustible en fase vapor visualizado con cámaras de alta velocidad y que preceden a un aumento sustancial del volumen de llama. Este cambio en la transparencia de la mezcla indica la transición entre la primera y segunda etapa del autoencendido. Esto ha sido corroborado por el autor con mediciones simultáneas de la luminosidad proveniente de la llama, lo cual es consistente con el final de la combustión de baja temperatura y el incremento de luminosidad captada por un diodo láser. Mientras que autores como Lillo et al. [82] han utilizado métodos alternativos para relacionar la finalización de la primera etapa de autoencendido con medidas de luminosidad de amplio espectro, definiendo temporalmente la transición entre la primera y segunda etapa de autoencendido a partir de la luminosidad acumulada en zonas de actividad propias de combustión fría.

Segunda etapa de autoencendido-combustión premezclada: Tal como se ha avanzado en la sección anterior a partir de la *Figura 2.1*, esta fase se corresponde con un aumento súbito de la liberación de calor y comienza una vez la energía transferida a la mezcla por el aire caliente y la liberación de calor de llama fría es lo suficientemente alta como para dar paso a la combustión de alta temperatura. En esta etapa, la disociación del peróxido de hidrógeno es dominante en el proceso químico y está delimitado temporalmente en la *Figura 2.7* (véase parte izquierda) por el incremento rápido de la liberación de calor acumulada (AHRR) entre los instantes 0.4-0.5 ms TASI. Mientras que paralelamente, la combustión se propaga a lo largo de las zonas de mezcla (completamente evaporada) que no han podido auto-encenderse de manera espontánea. Tanto en cuanto el retraso al autoencendido es mayor, la mezcla progresa con un dosado que se convierte cada vez más pobre. Mientras en el caso opuesto, un retraso al autoencendido menor conlleva a un proceso dominado por la incandescencia del hollín, relacionado con una alta luminosidad en imágenes como la del instante 0.505 ms TASI en la *Figura 2.7* (véase parte derecha) que supera de 3 a 5 veces el orden de magnitud de quimioluminiscencia detectada [73,74] proveniente de zonas activas/luminosas de la llama pobladas con partículas de hollín. Si bien resultan evidencias opuestas a lo explicado por Dec y Spey, la incapacidad de los sistemas ópticos usados por estos últimos limitaban la visualización de luminosidad asociada al hollín. Por otro lado, Bobba y Musculus [84] en su trabajo establecen que en condiciones de baja

temperatura resulta cuestionable que la luminosidad provenga del hollín en la zona de autoencendido. Mediante la aplicación de incandescencia inducida por láser (LII, acrónimo en inglés) en conjunto con fluorescencia inducida por láser (*PLIF*), Bobba y Musculus han determinado que la luminosidad no proviene de la sublimación de partículas de hollín, sino que proviene de formaldehidos fluorescentes generados durante la primera etapa de combustión tal como lo observado [85,86]. La vida de estos varía para los autores Bobba y Musculus [84] entre cientos a miles de microsegundos, según se aumenta la tasa de EGR o disminuye el contenido aromático del combustible empleado. En relación a sus observaciones, también han relacionado un desfase temporal entre el inicio del proceso de combustión y la aparición del hollín, que finalmente se propaga por la llama al igual que habían autores como Dec y Espey [72]. La relación en escalas temporales entre la aparición del hollín y la evolución de la presión en la cámara de combustión confirman un tiempo de retraso, ubicando la aparición del hollín después de la fase de combustión premezclada [87,88], aunque autores como Higgins et al. [74] la ubican entre el inicio de la combustión premezclada y el pico de liberación de calor. Indistintamente de la escala temporal de aparición del hollín, es a partir de iniciada la segunda etapa de combustión, en donde los esfuerzos se han concentrado para dar respuesta a la relación entre las escalas temporales en las que ocurre el autoencendido y la formación de hollín bajo las diversas condiciones de operación en las que puede trabajar el motor Diesel.

2.4.2. Influencia de las condiciones de operación y de inyección sobre el proceso de autoencendido

Es evidente que lo comentado anteriormente sobre el autoencendido en llamas Diesel está estrechamente relacionado con la química de la combustión. En primera instancia es el parámetro regulador de escalas temporales y espaciales del autoencendido, siendo el sumidero de interpretación de los procesos subsecuentes en cuanto a formación de contaminantes. En motores Diesel, la variación de las condiciones del ambiente de la cámara de combustión regulan el proceso globalmente con la temperatura, presión de admisión del motor y por tanto la densidad en cámara que vienen a ser los parámetros críticos de control. En el caso de aumento de la temperatura del aire en la cámara de combustión a densidad constante, si bien no modifica el proceso de mezcla, acelera la evaporación de la mezcla que en conjunto con una aumento de la tasa de reacción resulta en un retraso menor del autoencendido de la mezcla con una transición rápida entre la combustión de baja y alta temperatura. Por su parte, el incremento de la densidad

del aire en cámara a temperatura constante, se traduce en una disponibilidad mayor del aire a ser englobado por la mezcla, que aporta más entalpía al proceso de formación y evaporación de la mezcla para alcanzar el autoencendido en una escala temporal también más corta. Por otra parte, la recirculación de gases de escape (EGR), estrategia empleada en los motores actuales, ralentiza el proceso de preparación de mezcla y reacciones químicas prolongando el autoencendido temporalmente.

Los efectos relacionados como la presión de inyección se sustentan en muy poca información en la literatura relativa a la fenomenología del autoencendido. Estudios como el de Kuti et al. [90] refieren una reducción del tiempo de autoencendido de mezcla como consecuencia de la presión de inyección, relacionada con un incremento de la tasa de englobamiento de aire en el chorro. Los resultados de estos autores concuerdan con observaciones como las hechas por Heywood [4], aunque autores como Pickett et al. [89] refieren a que este efecto ocurre en una escala menor del efecto inducido por la temperatura o la densidad del aire. En relación con el efecto neto obtenido en un motor no transparente, Molina [91] ha determinado que el tiempo de retraso se escala empíricamente con la presión de inyección elevada a la potencia de -0.2. De hecho, el escalado empírico del autoencendido de chorros por medio de estudios de carácter óptico como los mostrados en la *Figura 2.8*, se rigen por una relación independiente de los parámetros de inyección, aunque sí dependiente de parámetros relacionados con la química. Es el caso de la relación vertida por Pickett et al. [83] (Ecuación 2.8), *Figura 2.8*, y que resulta una referencia en la literatura y estudios realizados en la caracterización de autoencendido de llamas de inyección directa [3,52,72,79,83]. En esta, el coeficiente empírico (A), la energía de activación del combustible (E), temperatura del aire (T_a), densidad del aire (ρ_a) y la fracción de mezcla estequiométrica (Z_{st}) de mezcla son los parámetros de escalado de retraso al autoencendido (τ_{ID}) con factores como los de la ecuación 2.9. Por otra parte, estudios como el de Nerva [3] han incluido propiedades físicas del combustible en su correlación, de lo cual el autor concluye la dependencia del τ_{ID} respecto a la densidad de combustible $\rho_f^{7.74}$ y la temperatura de evaporación del combustible $T_{10\%}^{1.78}$, $T_{50\%}^{-9.14}$ y $T_{90\%}^{7.64}$.

$$\tau_{ID} = A \cdot \exp(E / RT_a) \cdot \rho_a^n \cdot Z_{st}^m \quad (2.8)$$

$$\tau_{ID} = 9.19 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(6534 / T_a) \cdot \rho_a^{-0.96} \cdot Z_{st}^{-1.89} \quad (2.9)$$

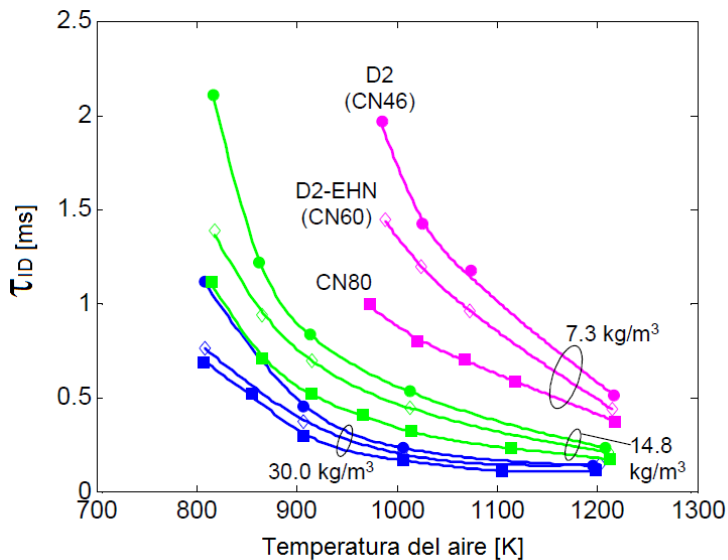


Figura 2.8.- Resultados de retraso al autoencendido adaptados del estudio de Pickett et al. [83]. Medidas obtenidas del análisis de presión en cámara de combustión de volumen constante. Variación de densidad y temperatura del aire en llamas de difusión de tres combustibles: D2 (Diesel de referencia); D2-EHN (mezcla de Diesel de referencia [99.25%] y $C_8H_{17}NO_3$ [0.725]); CN80 (mezcla de Hexadecano [76.5%] y $C_{16}H_{34}$ [23.5%]).

2.4.3. Estructura de la llama de difusión Diesel

Resultaría interminable el listado de referencias literarias las cuales hacen referencias al modelo planteado por Dec [92] para la descripción de la morfologías y estructura de la llama Diesel. En su trabajo en un motor óptico, el autor , encadenó una serie de experimentos que incluían medidas que daban trazabilidad a la primera etapa de combustión a baja temperatura a través de *Fluorescencia Planar Inducida por láser (PLIF)* , quimioluminiscencia del radical libre OH^* , característico de la combustión de alta temperatura, así como también de *Incandescencia Planar Inducida por Láser (PLII)* como herramienta de ubicación del hollín formado durante un proceso de inyección/combustión cuasi-estacionario (duración del comando eléctrico del inyector de 10 grados de giro de cigüeñal y velocidad de giro de 1200 rpm).

Temporalmente la llama de difusión definida por Dec empieza a desarrollarse una vez acaba la fase de autoencendido (analizada con el conjunto de imágenes de OH^* y $PLIF$ por el autor), mientras que espacialmente la llama difusiva se expande a partir de la localidad donde ocurre el autoencendido. El frente de llama se propaga en todo el campo de mezcla formado. Finalmente, la ubicación más cercana a la tobera depende de un balance de las velocidades del frente de llama y del campo de velocidades en el chorro, según advierte Peters [93] en su trabajo. En conjunto las observaciones de Dec han dado paso a una caracterización de la llama difusiva a partir de la singularidad de las reacciones químicas dentro de la llama, al igual de la composición química de los productos de combustión y ha definido a partir del esquema de la *Figura 2.9* que existen dos fases características de la llama difusiva:

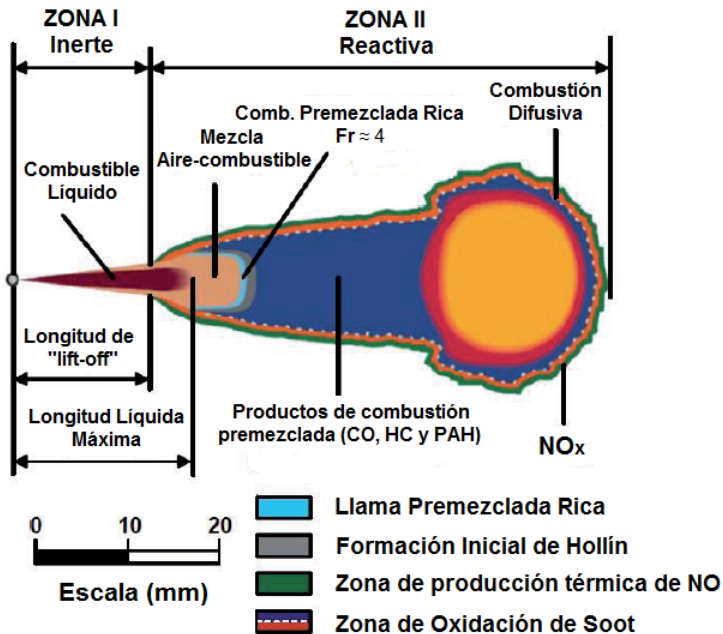


Figura 2.9.- Modelo conceptual de llama difusiva Diesel de Dec [92].

- La Fase I, corresponde con la zona del chorro donde ocurre todo el proceso de preparación de la mezcla y que transcurre en una condición inerte o no-reactiva del chorro. Esta transcurre a partir de la longitud intacta del combustible líquido (discutida en la sección 2.3) que se mezcla gradualmente con el aire caliente de los alrededores mientras que el dosado relativo de la misma decrece según aumenta la distancia axial o la temperatura del aire. En consecuencia, aguas abajo de la

longitud intacta, la transferencia de momento y energía ayudan a extender los límites en los cuales la mezcla está presente a expensas de una disminución de la velocidad del chorro. El establecimiento de la llama Diesel ocurre a partir de la longitud de despegue o “lift-off” en inglés (LoL), a partir de la cual se considera la llama auto-sustentada y característica de la combustión de alta temperatura definida por Dec [92], algo que también han definido Flynn et al. en su estudio [77].

- Transición Fase I-II, situada inmediatamente después de la longitud de lift-off (LoL). Dec [92] sugiere la existencia de una combustión desarrollada a partir de una mezcla rica, en las que las reacciones químicas consumen el oxígeno englobado desde las zonas no-reactivas (desde la Zona I). Los productos de combustión están compuestos mayormente de monóxido de carbono e hidrocarburos oxidados (PAH) que se constituyen como precursores del hollín formado dentro de la llama difusiva.
- Fase II, a partir de la distancia de LoL la llama obtiene su estructura típica de difusión a partir de una superficie de reacción, y que internamente contiene productos de combustión tal como se observa en la *Figura 2.9* (productos de combustión incompleta y hollín). Mientras que el englobamiento de aire y la mezcla con productos de combustión, les convierte en agua y dióxido de carbono para completar las reacciones de combustión. Las medidas de Dec y Coy [94] han determinado que las reacciones químicas ocurren en esta superficie, en la que experimentalmente Dec y Canaan [95] han determinado la mayor formación de NO_x. Mientras, que en extremos aguas debajo de la llama han determinado la mayor proporción de hollín y las mayores temperaturas de la llama.

Al igual que Dec, Flynn et al. [77] han descrito sus observaciones a partir del viaje que un ente de combustible inyectado en la cámara de combustión. Luego del proceso de formación de mezcla y evaporación (recapitulado en la sección 2.3), la temperatura de la misma se incrementa hasta los 700 K con un dosado relativo como el estimado por Dec [92] de 4. En el viaje de este a través la zona de combustión en la base de la llama, la temperatura se incrementa hasta los 1600 K. Al tratarse de un dosado rico, el agotamiento del oxígeno disponible según lo observado por Flynn et al. [77] forma productos de combustión hidrocarburos no saturados de cadena corta tales como C₂H₂, C₂H₄ y C₃H₃. Finalmente según lo observado por el autor, estos productos intermedios son la base para la subsecuente

formación de hollín mientras que la liberación de calor en esta etapa representa el 15% del total de la energía del combustible.

Posteriormente, el ente entra en la fase difusiva donde el aire englobado por la llama se emplea completamente en la superficie estequiométrica. A pesar de la imposibilidad de liberación de calor en esta superficie, los productos de combustión son re-englobados en la llama como se ha observado en estudios recientes a través de medidas de *Particle Image Velocimetry (PIV)* desarrollados por Meier et al. [96]. Lo cual sugiere que la composición de la mezcla y su temperatura a lo largo del eje de la llama varían. Una vez el ente atraviesa el frente de llama, el oxígeno reacciona con los productos intermedios de combustión generados, y se completa el proceso de combustión con la mayor tasa de liberación de energía alcanzando la llama una temperatura máxima y cercana al límite establecido por la temperatura adiabática de la misma para un dosado estequiométrico.

Según el ente de combustible atraviesa el frente de llama, la oxidación del hollín formado ocurre debido a las altas temperaturas alcanzadas coexistiendo con la formación de radicales libres del OH que tal como han observado Dec y Coy [94] o Kosaka et al. [80] vía *PLIF*, la visualización del hollín resulta envuelto por una capa de OH*, definido por estos autores como un indicativo de que la formación del OH* es un paso fundamental en la oxidación del hollín. Si bien el ente transita de manera cuasi-estacionaria durante el evento de inyección, una vez se acerca el final de inyección la estructura de la llama cambia radicalmente según las observaciones vertidas por Musculus y Katke [50]. Un aumento de la tasa de englobamiento en esta etapa, definida como la combustión lenta (ver *Figura 2.1*) al final de la inyección, tiene como consecuencia un retroceso de la longitud líquida máxima y en consecuencia la estructura de la llama se mueve aguas arriba de la LoL tal como han observado Knox et al. [97].

Ciertamente desde la aparición del modelo de Dec en 1997, muchos son los adelantos que se han dado en el diagnóstico óptico, ya que la inclusión de cámaras de alta velocidad y la extensibilidad de técnicas de cuantificación del hollín han repercutido en lo que se puede entender en una actualización del modelo presentado por Dec [92], específicamente en la formación de precursores de hollín, crecimiento y oxidación de partículas a lo largo de la fase difusiva de la llama. Autores como Bruneaux [98], Kosaka et al. [99] o Pickett y Siebers [100] han centrado sus esfuerzos en relacionar el proceso de mezcla con la formación de hollín. En su caso Bruneaux [98] con la inclusión de la *Incandescencia Inducida por láser (LII)* ha determinado que precursores ubicados en la base de la llama (zona de lift-off) son los primeros en transformarse en hollín como consecuencia de

la alta temperatura, mezcla rica y tiempo prolongado de residencia; resultando análogo al modelo de Dec [92]. Kosaka et al. [100] han determinado que los precursores de hollín y PAH interactúan con el OH de la periferia de la llama, en un proceso donde se producen partículas de hollín de pequeño tamaño y alta densidad que crecen aguas abajo en la zona de la llama donde rige el proceso de oxidación del hollín. Mientras que estudios como el de Pickett y Siebers [100] han relacionado el impacto del tiempo de residencia de la mezcla en la formación de hollín aguas abajo de la zona de autoencendido, de manera que la formación de hollín se relaciona con el dosado relativo de mezcla y el tiempo de residencia de la misma previa al autoencendido, observando reactividad de llamas con un dosado relativo tan bajos como 2.

Pickett et al. [83] así como diversos autores [3,52,72,73,76,78,79] en la literatura han puesto esfuerzos en definir espacialmente la formación de hollín y su relación con el proceso de mezcla. En este sentido, además del retraso al autoencendido (i.e. tiempo de residencia) la longitud de lift-off juega un papel importante en la combustión de carácter difusivo. Es característico de la investigación de lift-off, la utilización de marcadores de alta temperatura de la misma como lo es el OH*. Mediante la quimioluminiscencia, se ha observado una relación incipiente de los parámetros de inyección en el escalado de este parámetro macroscópico de la llama. Tal como advierte la ecuación 2.10, el estudio exhaustivo mediante quimioluminiscencia y aunque de carácter empírico se relaciona con la velocidad efectiva (U_{efec} en m/s) a la salida de la tobera, el diámetro de la misma (d_o en mm), densidad del aire (ρ_a en kg/m³), temperatura del aire (T_a en K) y la fracción de mezcla estequiométrica Z_{st} .

$$LoL = U_{efec}^{-1} \cdot d_o^{0.34} \cdot \rho_a^{-0.85} \cdot T_a^{-3.74} \cdot [Z_{st}]^{-1} \quad (2.10)$$

$$\phi(x) = \frac{2 \cdot (A/F)_{st}}{\sqrt{1 + 16 \cdot (x/x^+)^2} - 1} \quad (2.11)$$

Si bien el lift-off es una longitud característica de la llama Diesel (ver modelo conceptual de Dec en *Figura 2.9*), ésta resulta fundamental para el entendimiento de la formación de hollín. Autores como Pickett y Siebers [89,100] han estimado a través de parámetros de inyección y del ambiente de combustión, la cantidad de aire englobado por el chorro hasta la localidad del lift-off (LoL) a partir del parámetro x^+ ya descritos en la ecuación 2.4 y los planteados en la ecuación 2.11. A/F_{st} : relativo al dosado estequiométrico del combustible usado y x : relativo

a la longitud característica a evaluar el englobamiento, en este caso el lift-off LoL. De acuerdo al análisis vertido por Pickett y Siebers en [100], se puede decir que:

- La formación de hollín es dependiente de la propensión del combustible a formar hollín (características físico-químicas del combustible). Al aumentar la longitud de lift-off, también lo hace el aire englobado ϕ_{LoL} previo al autoencendido, siendo un efecto observable para llamas generadas a partir de combustibles con bajo número de cetano, compuesto por cadenas de carbono más simples y también en el caso de combustibles oxigenados.
- El incremento del proceso de englobamiento de aire aguas arriba del lift-off (aumento de ϕ_{LoL}) produce una mezcla cada vez más pobre, que una vez alcanza el proceso de combustión encuentra un límite de formación de hollín en mezclas con dosado relativo igual a 2. En condiciones de dosado inferiores, se ha observado quimioluminiscencia de OH* cerca del eje de la llama, indicativo de una llama libre de hollín.
- Mediante estimaciones a partir de un modelo simplificado de combustión han determinado que en localidades donde la temperatura es menor a los 1400-1600 K no ocurre formación de hollín alguna.

Estas observaciones en conjunto con lo vertido de las ecuaciones 2.10 y 2.11 es lo que Pickett y Siebers han presentado en su estudio [89] para escenificar la relación entre el lift-off y la formación de hollín en la *Figura 2.11*. En ella, el autor ha compuesto los resultados de llamas en un estudio de densidad del aire, temperatura del aire y presión de inyección sobre la formación de hollín en términos de la fracción volumétrica de hollín f_v en medidas obtenidas a partir de medidas simultáneas mediante la *Extinción de Luz* (LE) [101]. A partir de estas observaciones, en los casos de mayor LoL y por tanto englobamiento, la formación de hollín se reduce, como se observa en el menor valor de f_v (véase *Figura 2.10*). Geométricamente la formación de hollín se escala tanto en cuanto la longitud del lift-off se vea afectada, como se observa en la *Figura 2.10a*, la medida inicial de f_v se traslada aguas abajo de la tobera al igual que el máximo nivel detectado, que tal como refiere el auto marca el inicio de una fase donde predomina la oxidación del hollín. Mientras que en la *Figura 2.10b*, los autores destacan la relación entre llamas obtenidas en condiciones diferentes de combustión que parecen colapsar en una descripción única en escalas adimensionales a partir del inverso del dosado local a lo largo del eje de la llama $1/\phi$ y una escala de f_v corregida con la mayor densidad del estudio de Pickett y Siebers [89] de 30 kg/m^3 . Los autores destacan la no linealidad de la formación de hollín con respecto a la densidad del aire en la

cámara de combustión. Tal como se apunta en la figura en iso-condiciones de englobamiento ($\phi=3.1$) la formación de hollín resulta en una relación de escalado de $\rho_a^{2.2}$, mientras que en condiciones de iso-temperatura resulta en un escalado de $\rho_a^{2.5}$. El efecto de la presión de inyección también ha sido abordado por Pickett y Siebers, tal como se refieren en la *Figura 2.10a-b*, al aumentar la presión de inyección se reduce la fracción volumétrica de hollín f_v . También se hace referencia en este trabajo a la poca influencia de la velocidad de inyección en la evolución temporal de hollín, en el que el proceso de oxidación parece iniciarse alrededor de la misma distancia axial. Aunque en términos absolutos de fracción volumétrica f_v , el aumento de la presión de inyección promueve mayor englobamiento aguas arriba del lift-off y en una menor f_v (véase *Figura 2.10c*).

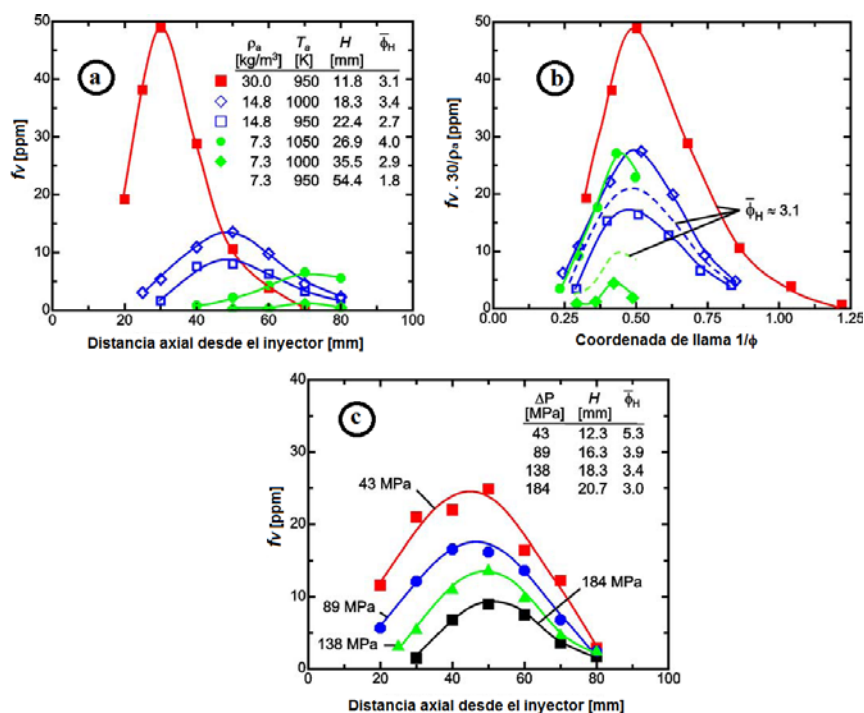


Figura 2.10.- Evolución a la fracción volumétrica de hollín f_v en estudio paramétrico de Pickett y Siebers [89] que incluye variaciones de temperatura del aire, densidad del aire y presión de inyección. (a) Evolución axial, (b) Evolución en coordenadas adimensionales de llama y fracción respecto a la mayor densidad de aire estudiada 30 kg/m³. (c) Evolución axial de la f_v de hollín para distintas presiones de inyección. Símbolos representan medidas de f_v obtenidas por medio de medidas simultáneas del método de extinción de luz e incandescencia láser *LII*. Línea sólida representa el mejor ajuste polinómico para cada condición estudiada.

En la *Figura 2.10* los símbolos en la figura representan un valor singular, es decir una medida específica de la fracción volumétrica de hollín f_v en cada una de las coordenadas axiales del chorro provenientes de medidas de *Extinción de luz* LE. El potencial de estas medidas y específicamente está en la capacidad para obtener la concentración f_v de hollín en cada coordenada axial de la llama, ya que el con LE se determina la atenuación a lo largo del camino óptico de la llama, lo que en resumen sirve como elemento de calibración en procesos de deconvolución de la llama o de calibración para medidas como la *Laser Induced Incandescence* LII, que resulta de luminosidad de un sección transversal al camino óptico evaluado con LE (detalles de calibración de ambas técnicas en [101]). Tal solución, resulta ciertamente desafiante en cuanto a la cantidad de recursos y puesta a punto en entornos experimentales, de los cuales se requieren al menos tres accesos ópticos para plantear el arreglo experimental necesario. Es por ello, que en la literatura han aparecido técnicas experimentales ópticamente menos complejas y que ayudan al entendimiento de la formación de hollín en llamas Diesel.

La termometría de dos colores se define en la literatura como un elemento útil para la investigación de llamas Diesel. Zhao y Ladommatos [102] en su trabajo revisan de forma detallada la técnica que se basa en la radiación proveniente del hollín contenido en la llama. Dicha radiación es función de la cantidad de hollín en la llama, la longitud de onda de emisión y la temperatura del hollín contenido en la llama. El potencial de esta técnica radica en la capacidad de dar solución de a la ecuación 2.12 que además de proveer elementos de análisis de la cantidad de hollín a través del parámetro KL, proporciona estimaciones de la temperatura del hollín presente en la llama. Tal como refieren autores como Kamimoto [103], las medidas de temperatura resultan en el valor añadido de la técnica, ya que permite ahondar cuantitativamente en el “trade-off” hollín-NOx por medio de los valores de KL y temperatura respectivamente. Ciertamente la técnica resulta compleja si se atiende a la solución óptica a la que la literatura se refiere en su aplicación que puede usar elementos duplicadores de imagen para captar la radiación proveniente de la llama en dos longitudes de onda distintas [104] o bien el uso de dos cámaras [52] para captar dicha radiación. El análisis de la información deriva finalmente en un sistema de ecuaciones a partir de la ecuación 2.12 que dan solución física a la concentración de hollín KL_{2C} y la temperatura T_{2C} . Mientras que las fuentes de errores de las medidas provienen de los elementos de calibración necesarios, y la correspondencia que ha de existir entre radiancia proveniente de la llama en las dos longitudes de onda diferentes.

$$I_{\text{hollin}}(\lambda, T, KL) = \left[1 - \exp\left(-\frac{KL}{\lambda^\alpha}\right) \right] \frac{1}{\lambda^5} \frac{c_1}{\left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (2.12)$$

En la solución encontrada por diversos autores como Payri [104], García [1], Pastor [105] o Nerva [3] se ha investigado en un motor óptico sobre los efectos de parámetros de motor sobre los resultados de la técnica, es decir, KL y temperatura del hollín en llamas de difusión. En las condiciones evaluadas por estos autores, típicas de combustión de alta temperatura y sin recirculación de gases de escape, las tendencias ya comentadas en la formación de hollín se han contrastado y es: un aumento de la concentración de hollín a través del factor KL como consecuencia de disminución de la presión de inyección, así como del aumento de la temperatura y densidad del aire. Mientras que Nerva [3] en su estudio de combustibles sustitutivos del Diesel comercial ha identificado y relacionado una disminución de la concentración de hollín a través del KL relacionado con un incremento del lift-off en combustibles como el RME. Tal como se muestra en la *Figura 2.11*, Nerva [3] ha incluido la relación existente entre medidas de extinción de luz y termometría de dos colores, que si bien parten de bases teóricas muy distintas resultan en evoluciones espaciales similares de KL contenido en la llama.

En el caso de la temperatura resultado del Método de Dos Colores, existen diferentes puntos de vista en el resultado final. Mientras que Pastor [105] observa una temperatura que tiende a incrementarse en zonas de llamas en las que la concentración de hollín es muy baja, autores como Nerva [3] no observa una tendencia clara en la evolución de la temperatura del hollín a lo largo del eje de la llama tal como se observa en la *Figura 2.11*. Tal observación es consistente con resultados de Payri et al. [104] y García [1]. Partiendo de un análisis teórico del proceso de absorción y emisión a lo largo del camino óptico de la llama, estos autores han planteado un modelo de cálculo en el que el resultado final de KL y temperatura a partir del cual se ha determinado que la temperatura de llama sólo varía un 4% (105 K) en llamas simuladas con distribuciones uniformes de KL entre 0.1 y 3. Los autores en este caso manifiestan que la técnica puede sesgar el resultado final de la temperatura de hollín, ya que en llamas reales efectivamente se encuentran factores KL variables. Por su parte Singh et al. [106] indirectamente coinciden con estas observaciones evaluando llamas características de combustión de alta y baja temperatura desarrolladas en un motor óptico donde se han definido tres casos: un inicio de inyección característico de alta temperatura, otro muy avanzado y otro muy retrasado, siendo característicos del motor Diesel. Los resultados de este estudio muestran que las temperaturas del hollín en las llamas

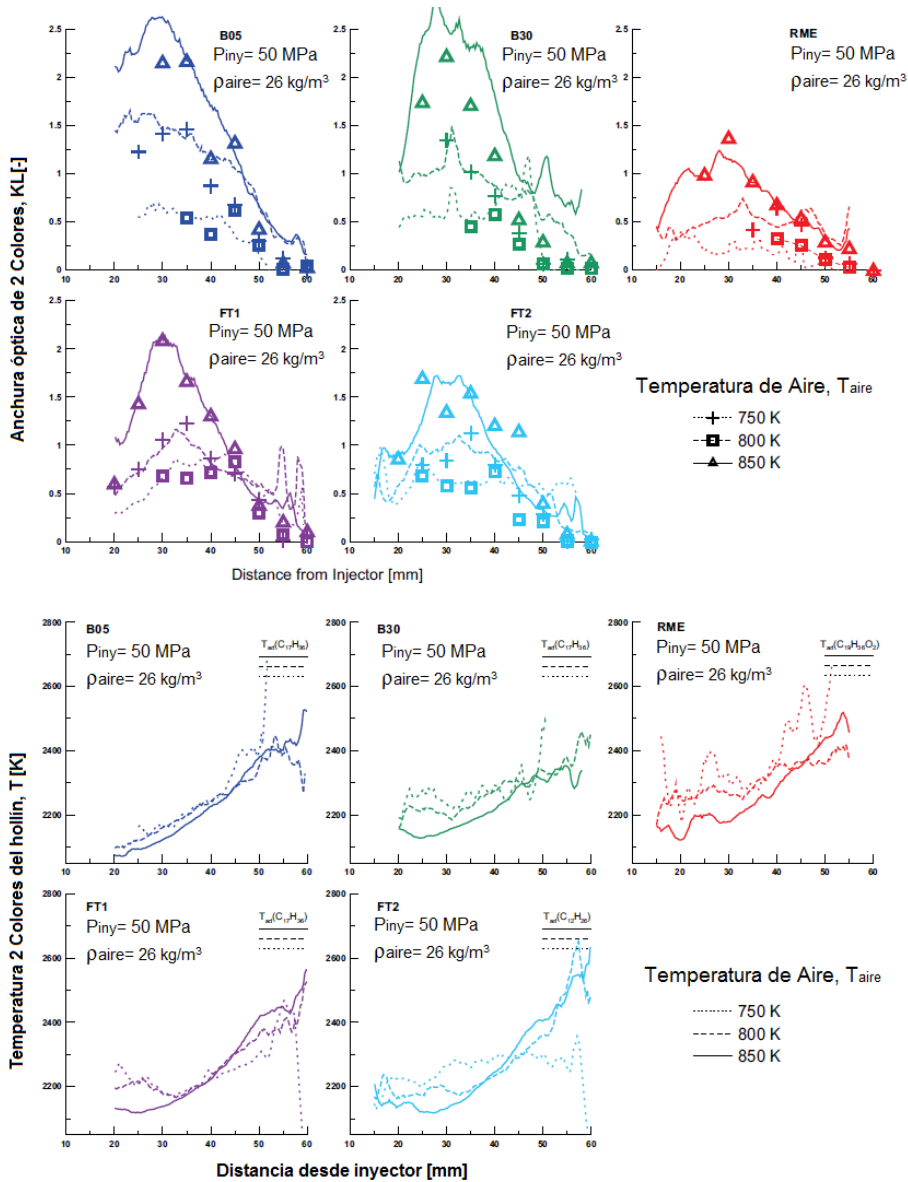


Figura 2.11.- Evolución axial de KL y temperatura de hollín a través de dos colores [3]. Símbolos representan medidas puntuales por medio de extinción de Luz (LE). Parejas de (KL y temperatura) para cada uno de los combustibles empleados por el autor: B05, B30, RME, FT1 y FT2. Efecto de la temperatura del aire, en iso-condiciones de densidad (26 kg/m³) y presión de inyección (50 MPa). Líneas transversales indican la temperatura adiabática llama. Nota: El autor establece una relación entre el KL_{2C} y KL_{LE} tal que: KL_{LE} = 2.502 KL_{2C} (consultar [3] para más detalles).

resultan similares a las adiabáticas de llama. Mientras que han observado que en condiciones de alta temperatura la temperatura del hollín parece estar sesgada en una mayor proporción (incluso hasta 300 K). Motivado por tal discrepancia, Musculus et al. [107] se han apoyado en el cálculo CFD para simular los procesos de propagación de la radiación y han estimado una temperatura del hollín que han comparado con las medidas de dos colores. Sus conclusiones sustentan las observaciones de Singh et al. [106], la temperatura medida dos colores es más fría. En el caso de combustión convencional, las diferencias rondan los 200 K mientras que en la combustión de baja temperatura es inferior a 100 K, observaciones que distan del máximo de 1 K respecto en estudios aplicando la misma técnica experimental [107]. Recientemente en el trabajo de Bardi [52], la respuesta a la variabilidad de la tasa de inyección se ha investigado y el efecto en la temperatura del hollín y la concentración de hollín se han observado en consistencia con las previamente comentadas, aunque cualquier efecto de la variabilidad de las condiciones locales de combustión y el englobamiento en la longitud de lift-off (consecuencia de una tasa de inyección variable), no muestran ningún efecto en las variables de respuesta del Método de Dos Colores.

No hay que dejar de lado el hecho que la medida siendo de carácter espacial revela un alta relación en el “acople” de la radiación proveniente de la llama en el caso de esta tesis registrada en dos cámaras diferentes (véase ecuación 2.12). Nerva [3] en su trabajo, advierte la dificultad que genera construir una solución válida en su experimentación, ya que en fases iniciales del análisis digital se encontraba con soluciones matemáticas que arrojaban valores de KL y temperatura del hollín fuera de los límites esperados en llamas Diesel. También, ha plasmado la necesidad de aplicar algoritmos de transformación de imagen para corresponder pixel a pixel las imágenes objetivo de la técnica. Incluso luego de ello, el autor ha decidido descartar del proceso aquellos resultados que aún se estimaban incoherentes dentro de la solución final, que se advierten proporcionalmente significativas en su trabajo.

En la literatura se encuentran resultados que invitan a entender la no correspondencia espacial. Trabajos como el de Pastor et al. [105], García [1], Nerva [3], o Zha et al. [108] muestran resultados con temperaturas superiores a la adiabática de llama en la periferia de la misma, así como también en su interior. Y es que el balance de KL y temperatura en zonas de baja concentración de hollín es sensible de error en el resultado final. Por lo que resulta de interés definir un entorno de experimentación controlado para entender si hay efectivamente una mejora en la solución final.

2.4.4. Evolución transitoria del chorro reactivo

Una vez que se han abordado en las secciones anteriores los aspectos más relevantes sobre el proceso de inyección /combustión y su relación con la fase difusiva del proceso de combustión, se deduce que es necesaria la definición y modificación de parámetros macroscópicos del chorro que están estrechamente ligados a las condiciones de operación del motor. Es ingente la cantidad de investigación relativa a estos procesos, si bien hay aspectos aún abiertos y sujetos a discusión en la literatura. Es ahora tiempo oportuno para abordar aquellos objetivos que se han considerado como el principal aporte de este documento partiendo de puntos ya revisados en las secciones previas.

Hay que reconocer el actual interés en la puesta a punto de modelos matemáticos complejos incorporados en herramientas CFD para la caracterización del proceso de inyección/combustión. La reducción de recursos que supone respecto a un estudio empírico, sin discusión es menor. Tal como plantean y comunidades como la *Engine Combustion Network* [71], es de interés a nivel industrial, el alimentar modelos de cálculo CFD con resultados experimentales fiables, que permitan validar los cálculos en casos experimentalmente menos complejos.

No es así, en el caso de estudios en presencia de combustión. Ni siquiera hay una descripción fenomenológica de cómo ocurre la evolución del flujo en presencia de un frente de llama activo. Más aún, algunos de los trabajos existentes datan de tiempos en que la visualización de alta velocidad distaba de las capacidades actuales en cuanto a resolución temporal, lo cual puede resultar definitivo en la descripción del proceso.

Un ejemplo es el estudio de Siebers [5], en el que el autor ha hecho un extenso estudio del efecto de la evaporación sobre la penetración de chorros no reactivos. Adicionalmente, se incluye datos relativos a la relación entre la evolución temporal de la mezcla y el proceso de combustión. En la *Figura 2.11*, los resultados en escalas adimensionales derivadas de las ecuaciones 2.13 a 2.15 dan cuenta de la evolución temporal para el estudio de densidades del aire estudiado por Siebers [60]. En sus observaciones, relata un chorro reactivo que resulta difícil definir en sus inicios y que además parece acusar el efecto de evaporación y penetrar más despacio que el chorro no-reactivo. El inicio de combustión (en escalas de $\tilde{\tau}=20$), parece afectar a la morfología del chorro que termina acelerándose y penetrando más rápido que el chorro no reactivo (a partir de $\tilde{\tau}=30$). Este efecto de aceleración, según el autor presumiblemente se relaciona con la variación de la densidad del aire en la cámara de combustión. En términos de tasa

de penetración respecto del caso no-reactivo cerca del final de inyección (en escalas de $\tilde{t}=270$) la penetración de la llama tiende a lo estipulado en la ley de escalado desarrollada por el autor en [60] para chorros no-reactivos.

$$\tilde{t} = \frac{\tilde{S}}{2} + \frac{\tilde{S}}{4} \cdot \sqrt{1+16 \cdot \tilde{S}^2} + \frac{1}{16} \ln \left(4 \cdot \tilde{S} + \sqrt{1+16 \cdot \tilde{S}^2} \right) \quad (2.13)$$

$$\tilde{t} = \frac{t}{t^+} \quad (2.14)$$

$$\tilde{S} = \frac{S}{x^+} \quad (2.15)$$

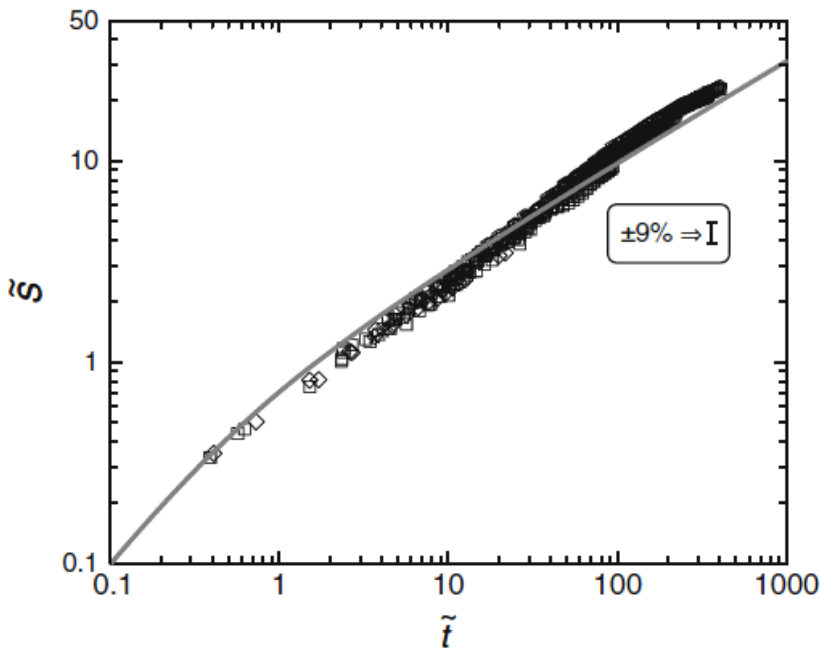


Figura 2.12.- Evolución en escalas adimensionales de la penetración de chorros reactivos publicada en [5]. Símbolos que representan la evolución de llamas en las que se ha variado la densidad del aire en la cámara de combustión (3.3-6.8-13.9-28.6-58.6 kg/m³). Línea sólida representa la evolución temporal la penetración de un chorro no-reactivo estimado a partir de la ley de escalado de Naber y Siebers [60].

Otro ejemplo, con observaciones no convergentes a lo comentado por Siebers en [5] es el trabajo de Pickett et al. [81]. En la *Figura 2.13*, el escenario resulta distinto en un proceso de combustión que a diferencia del estudio de Siebers [5] con templa recirculación de gases de escape (12% O₂). Más allá de la desaceleración de la llama producto de la evaporación y autoencendido, incluso comparando con el caso no-evaporativo el chorro reactivo penetra más despacio que el inerte. De este análisis hay que descartar las diferencias observadas en la zona de las llamas frías que son inherentes a la técnica óptica de schlieren empleada que induce a la “desaparición” del frente de llama entre 700 y 1000 μ s. Un último estudio de Kobayashi et al. [109], muestra en escalas de penetración como las de Pickett et al. [81] que un chorro reactivo sin EGR (21% O₂) no modifica su evolución después del autoencendido, mientras que la evolución luego del final de inyección (3.2 ms ASOI) experimenta una ligera aceleración del chorro.

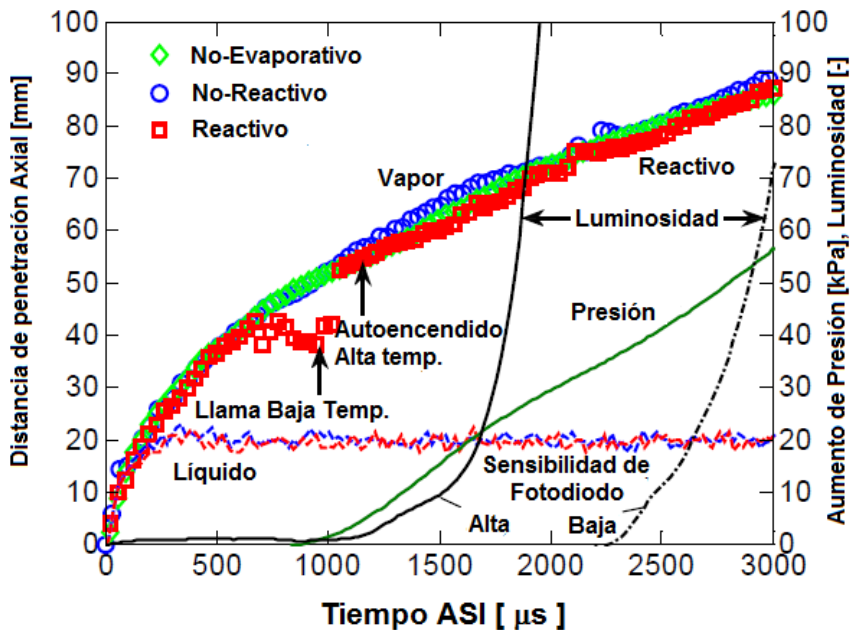


Figura 2.13.- Evolución temporal de chorros no-evaporativos ($T_{\text{aire}}=455\text{K}$), no-reactivos (0 % O₂, $T_{\text{aire}}=900\text{K}$) y reactivos (12 % O₂, $T_{\text{aire}}=900\text{K}$) en cámara de combustión de volumen constante [81]. Densidad del aire 22.8 kg/m³, diámetro de tobera $d_0=108\ \mu\text{m}$, presión de inyección $P_{\text{iny}}=110\ \text{MPa}$ y 3000 μs de tiempo de energización del inyector.

Como cierre a esta revisión del proceso de combustión Diesel y de la aplicación de técnicas ópticas para su investigación, es importante resaltar que los puntos descritos han sido el pilar para el planteamiento de los objetivos de esta

tesis descritos en el capítulo 1 y que resulta redundante en enumerar nuevamente. No obstante, identificados ya los puntos de investigación aún abiertos, en los siguientes capítulos se plantean tanto la experimentación como el análisis que dan respuestas a los objetivos marcados para esta tesis.

2.5. Referencias

- [1]. García, J. M., “Aportaciones al estudio del proceso de combustión turbulenta de chorros en motores diesel de inyección directa”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2004.
- [2]. Novella R., “Estudio de la influencia de los ciclos Atkinson y Miller sobre el proceso de combustión y las emisiones contaminantes en un motor Diesel. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2009.
- [3]. Nerva J. G., “An assessment of fuel physical and chemical properties in the combustion of a diesel spray”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2013.
- [4]. Heywood J. B., *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Publishing 1988.
- [5]. Arcoumanis C., Kamimoto T., *Flow and combustion in reciprocating engines*. Springer-Verlag, 2009.
- [6]. Payri F, Desantes J. M., *Motores de combustión interna alternativos*. 1^{era} edición Editorial Revertè, 2011.
- [7]. Glassman I., Yetter R., *Combustion*, 4th Ed., Academic Press, 2008.
- [8]. Turns S.R., *An introduction to combustion*, 2nd Edition., McGraw-Hill Publishing, 2000.
- [9]. Musculus M., Kattke K., “Entrainment waves in diesel jets”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 2(1), pp. 1170-1193, 2009.
- [10]. Knox B., Genzale C., Pickett, L., Garcia-Oliver J. et al., “Combustion recession after end of injection in diesel sprays”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 8(2), pp. 679-695, 2015.
- [11]. Musculus M. P. B., Lachaux T., Pickett L.M., Idicheria C., “End-of-injection over-mixing and unburned hydrocarbon emissions in low-temperature-combustion diesel engines”. *SAE Paper* 2007-01-0907, 2007.
- [12]. Gimeno J. “Desarrollo y aplicación de la medida del flujo de cantidad de movimiento de un chorro Diesel”. *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2008.

- [13]. Payri R., García J.M., Salvador F.J., Gimeno J., “Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics”. *Fuel*, Vol. 84, pp. 551-61, 2005.
- [14]. Salvador F. J., “Estudio teórico experimental de la influencia de la geometría de toberas de inyección Diesel sobre las características del flujo interno y del chorro. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2003.
- [15]. Payri F., Bermúdez V., Payri R., Salvador F.J., “The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles”. *Fuel*, Vol. 83, pp. 419-31, 2004.
- [16]. Incropera F, DeWitt D., “Fundamentos de la transferencia de calor”. *Prentice Hall*, 1996.
- [17]. Settles G.S., Schlieren and shadowgraph techniques, Springer-Verlag, 2001.
- [18]. Payri R., Salvador F.J., Gimeno J, Venegas O., “Study of cavitation phenomenon using different fuels in a transparent nozzle by hydraulic characterization and visualization”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 235–244, 2013.
- [19]. Blessing M., König G., Krüger C., Michels U. et al., “Analysis of flow and cavitation phenomena in diesel injection nozzles and its effects on spray and mixture formation”. *SAE Paper* 2003-01-1358, 2003.
- [20]. Bracho G., “Experimental and theoretical study of the direct diesel injection process at low temperatures”. *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2011.
- [21]. Payri R., Gimeno J., Bardi M., Plazas A., “Study liquid length penetration results obtained with a direct acting piezo electric injector”. *Applied Energy*, Vol. 106, pp. 152–162, 2012.
- [22]. Desantes J. M., Salvador F. J., Carreres T., Martínez J., “Large-eddy simulation analysis of the influence of the needle lift on the cavitation in diesel injector nozzles”. *P.I. Mech. Eng. D.*, Vol. 229, pp. 407-423, 2015.
- [23]. Molina S., Salvador F. J., Carreres M., Jaramillo D., “A computational investigation on the influence of the use of elliptical orifices on the inner nozzle flow and cavitation development in diesel injector nozzles”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 79, pp. 114-127, 2014.
- [24]. Tree D. R., Svensson K. I., “Soot processes in compression ignition engines”. *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 33, pp. 272-309, 2007.
- [25]. O'Connor, J. Musculus M., “In-cylinder mechanisms of soot reduction by close-coupled post-injections as revealed by imaging of soot luminosity and planar laser-induced soot incandescence in a heavy-duty diesel engine”. *SAE Int. J. Engines*, Vol: 7(2), pp. 673-693, 2014.

- [26].Hessel, R., Reitz, R., Yue, Z., Musculus, M. et al., “Applying advanced CFD analysis tools to study differences between start-of-main and start-of-post injection flow, temperature and chemistry fields due to combustion of main-injected fuel”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 8(5), 2015, doi:10.4271/2015-24-2436.
- [27].García A., “Estudio de los efectos de la post inyección sobre el proceso de combustión y la formación de hollín en motores Diesel”. *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2009.
- [28].Yue Y., Powell C. F., Poola R., Wang J. et al., “Quantitative measurements of diesel fuel spray characteristics in the near-nozzle region using X-ray absorption”. *Atomization and sprays*, Vol 11(4), pp. 471-490, 2001.
- [29].Macphee A. G. Tate M., Powell C., Yue Y. et al. “X-ray imaging of shock waves generated by high-pressure fuel sprays”. *Science*, Vol. 295, pp. 1261–1263, 2002.
- [30].Kastengren Am Powell, C. “Spray density measurements using X-ray radiography”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* Vol. 221(6), pp. 653–662, 2007.
- [31].Linne M., Paciaroni M., Hall T., and Parker T., “Ballistic imaging of the near field in a diesel spray”. *Experiments in Fluids*, Vol. 40(6), pp. 836–846, 2006.
- [32].Higgins B. S., Mueller C. J., Siebers D., “Measurements of fuel effects on liquid-phase penetration in DI sprays”. *SAE Paper 1999-01-0519*, 1999.
- [33].Klein-Douwel R., Frijters P. Somers L. de Boer W., et al. “Macroscopic diesel fuel spray shadowgraphy using high speed digital imaging in a high pressure cell”. *Fuel*, Vol. 86(12-13), pp. 1994-2007, 2007.
- [34].Reitz R. D., Bracco F. V., “Mechanism of atomization of a liquid jet”. *Phys. Fluids*, Vol. 25, pp. 1730-1742, 1982.
- [35].Reitz R.D., Bracco F.V., “Mechanisms of breakup of round Liquid jets”. *The Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol. 3, Chapter 10, pp. 233-249, 1986.
- [36].Arrègle J., Pastor J.V., Ruiz S., “The influence of injection parameters on diesel spray characteristics”. *SAE Paper 1999-01-0200*, 1999.
- [37].Pickett L., Manin J., Kastengren A., Powell C., “Comparison of near-field structure and growth of a diesel spray using light-based optical microscopy and X-ray radiography”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 7(2), pp.1044-1053, 2014.
- [38].Desantes J., Payri R., Salvador F., de la Morena J., “Cavitation effects on spray characteristics in the near-nozzle field”. *SAE Paper 2009-24-0037*, 2009.

- [39].Hiroyasu H., Arai M., “Structures of fuel sprays in diesel engines”. *SAE Paper* 900475, 1990.
- [40].Soare V.T., “Phase doppler measurements in diesel dense sprays: Optimization of measurements and study of the orifice geometry influence over the spray at microscopic level”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2007.
- [41].Siebers D., “Liquid-phase fuel penetration in diesel sprays”. *SAE Paper* 980809, 1998.
- [42].Siebers D., “Scaling liquid-phase fuel penetration in diesel sprays based on mixing-limited vaporization”. *SAE Paper* 1999-01-0528, 1999.
- [43].Espy C., Dec J. E., “The effect of TDC temperature and density on the liquid-phase fuel penetration in a DI diesel engine”. *SAE Paper* 952456, 1995.
- [44].Pickett L., Kook S., Williams T., “Transient liquid penetration of early-injection diesel sprays”. *SAE Paper* 2009-01-0839, 2009.
- [45].Pastor J. V., Pastor J. M., Gimeno J., Nerva J.-G., “The effect of Biodiesel fuel blend rate on the Liquid-phase fuel penetration in diesel engine conditions”. *SAE Paper* 2009-24-0051, 2009.
- [46].Fisher B. T, Mueller C. J. “Liquid penetration length of heptamethylnonane and trimethylpentane under unsteady in-cylinder conditions”. *Fuel*, Vol. 89, pp. 2673–2696, 2010.
- [47].Canaan R., Dec J., Green R., Daly D., “The influence of fuel volatility on the liquid-phase fuel penetration in a Heavy-Duty D.I. diesel engine” *SAE Paper* 980510, 1998.
- [48].Kook S. Pickett L. “Liquid length and vapor penetration of conventional, Fischer–Tropsch, coal-derived, and surrogate fuel sprays at high-temperature and high-pressure ambient conditions”. *Fuel*, Vol. 93, pp. 539–548, 2012.
- [49].Pickett L., Manin J., Genzale C., Siebers D. et al., “Relationship between diesel fuel spray vapor penetration/dispersion and local fuel mixture fraction”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 4(1), pp. 764-799, 2011.
- [50].Musculus, M. Kattke, K., “Entrainment waves in diesel jets”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 2(1), pp. 1170-1193, 2009.
- [51].Pastor J. V., Payri R. García-Oliver J. M., Briceño F. J. “Analysis of transient liquid and vapor phase penetration for diesel sprays under variable injection conditions”. *Atomization and Sprays*, Vol. 21(6), pp. 503–520, 2011.
- [52].Bardi M., “Partial needle lift and injection rate shape effect on the formation and combustion of the diesel spray”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, 2014.

- [53]. Siebers D., "Scaling liquid-phase fuel penetration in diesel sprays based on mixing-limited vaporization". *SAE Paper* 1999-01-0528, 1999.
- [54]. Pastor J. V., López J. J., García J. M., Pastor J. M., "A 1D model for the description of mixing-controlled inert diesel sprays". *Fuel*, Vol. 87(13-14), pp. 2871-2885, 2008.
- [55]. Benajes J., García-Oliver J. M., Novella R., Kolodziej, C., "Increased particle emissions from early fuel injection timing diesel low temperature combustion". *Fuel*, Vol. 94, pp. 184-190, 2012.
- [56]. López J. J., García-Oliver J. M., García A., Domenech V., "Gasoline effects on spray characteristics, mixing and auto-ignition processes in a CI engine under Partially Premixed Combustion conditions". *Applied Thermal Engineering*, Vol. 70(1), pp. 996-1006, 2014.
- [57]. Espey C., Dec J. E., Litzinger T. A., Santavicca D. A., "Planar laser rayleigh scattering for quantitative vapor-fuel imaging in a diesel jet". *Combust. Flame* 109:65, 1997.
- [58]. Schulz C., Gronki J., Andersson S., "Multi-species laser-based imaging measurements in a diesel spray". *SAE Paper* 2004-01-1917, 2004.
- [59]. Idicheria C., Pickett, L., "Quantitative mixing measurements in a vaporizing diesel spray by rayleigh imaging". *SAE Paper* 2007-01-0647, 2007.
- [60]. Naber J. Siebers D., "Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays". *SAE Paper* 960034, 1996.
- [61]. Pickett L., Hoogterp L., "Fundamental spray and combustion measurements of JP-8 at diesel conditions". *SAE Int. J. Commer. Veh.*, Vol. 1(1), pp.108-118, 2009.
- [62]. Pastor, J., Payri, R., Garcia-Oliver, J., Nerva, J., "Schlieren measurements of the ECN-Spray A penetration under inert and reacting conditions." *SAE Paper* 2012-01-0456, 2012.
- [63]. Baert R., Frijters P., Somers B., Luijten C. et al., "Design and operation of a high pressure, high temperature cell for HD diesel spray diagnostics: guidelines and results". *SAE Paper* 2009-01-0649, 2009.
- [64]. Hiroyasu T., Kadota T., Arai, M., "Supplementary comments: fuel spray characterization in diesel engines". *Combustion Modeling in Reciprocating Engines*, Plenum Press, pp. 369-408, 1980.
- [65]. Hiroyasu, T. Arai M., "Structure of fuel sprays in diesel engines". *Transactions of the SAE*, Vol. 99(3), pp. 1050-1061, 1990.
- [66]. Dent J. C., "A basis for the comparison of various experimental methods for studying spray penetration". *Transactions of the SAE*, Vol. 80, pp. 1881-1884, 1971.

- [67].Varde K., Popa D., Varde L., "Spray angle and atomization in diesel sprays". *Transactions of the SAE*, Vol. 93(4), pp. 779-787, 1984.
- [68].Reitz R. D., Bracco F. B., "On the dependence of spray angle and other spray parameters on nozzle design and operating conditions". *SAE Paper 790494*, 1979.
- [69].Bysveen M., Almås T., Ulvund K. A., Jørgensen A., "Development of a shadowgraph image technique describing the fuel spray behavior in a rapid compression machine". *SAE Paper 2004-01-2934*, 2004.
- [70].Jung, Y., Manin, J., Skeen, S., and Pickett, L., "Measurement of liquid and vapor penetration of diesel sprays with a variation in spreading angle". *SAE Paper 2015-01-0946*, 2015.
- [71].Engine Combustion Network (ECN),
<http://www.sandia.gov/ecn/cvdata/targetCondition/sprayA.php>.
- [72].Dec J. E., Espey C., "Ignition and early soot formation in for D.I. diesel engine using multiple 2-D imaging diagnostics". *SAE Paper 950456*, 1995.
- [73].Dec J. E., Espey C., "Chemiluminescence imaging of autoignition in for DI diesel engine". *SAE Paper 982685*, 1998.
- [74].Higgins B., Siebers D., Aradi A., "Diesel-spray ignition and premixed burn behaviour". *SAE Paper 2000-01-0940*, 2000.
- [75].Gaydon A. G., "The spectroscopy of flames". Chapman and Hall Ltd., 1974.
- [76].Dec J. E., Coy E. B., "Radical OH imaging in for DI diesel engine and the structure of the early diffusion flame". *SAE Paper 960831*, 1996.
- [77].Flynn P. F., Durret R. P., Hunter G. L., zur Loye A. et al., "Diesel combustion: an integrated view combining laser diagnostics, chemical kinetics and empirical validation". *SAE Paper 1999-01-0509*, 1999.
- [78].Idicheria C., Pickett L., "Formaldehyde visualization near lift-off location in a diesel jet". *SAE Paper 2006-01-3434*, 2006.
- [79].Idicheria C. A., Pickett L. M., "Ignition, soot formation, and end-of-combustion transients in diesel combustion under high-EGR conditions". *Int. J. Engine Res.*, Vol. 12, pp. 376-392, 2011.
- [80].Kosaka H., Drewes V. H., Catalfamo L., Aradi A. A., et al., "Two- dimensional imaging of formaldehyde formed during the ignition process of diesel fuel spray". *SAE Paper 2000-01-0236*, 2000.

- [81].Pickett L.M., Kook S., Williams T., “Visualization of diesel spray penetration, cool- flame, ignition, high-temperature combustion, and soot formation using high- speed imaging”. *SAE Paper* 2009-01-0658, 2009.
- [82].Lillo P., Pickett L., Persson H., Andersson, O. et al., “Diesel spray ignition detection and spatial/temporal correction”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 5(3), pp. 1330-1346, 2012.
- [83].Pickett L., Siebers D., Idicheria C., “Relationship between ignition processes and the lift-off length of diesel fuel jets”, *SAE Paper* 2005-01-3843, 2005.
- [84].Bobba M., Musculus M., “Laser diagnostics of soot precursors in a heavy-duty diesel engine at low-temperature combustion conditions”. *Combustion and Flame*, Vol. 159, pp. 832-843, 2012.
- [85].Hoffmann T., Hottenbach, P., Koss, H., Pauls, C. et al., “Investigation of mixture formation in diesel sprays under quiescent conditions using Raman, Mie and LIF diagnostics”. *SAE Paper* 2008-01-0945, 2008.
- [86].Musculus M., “Multiple Simultaneous Optical Diagnostic Imaging of Early-Injection Low-Temperature Combustion in a Heavy-Duty Diesel Engine”. *SAE Paper* 2006-01-0079, 2006.
- [87].Edwards C.F., Siebers D., Hoskin D.H., “A study of the autoignition process of diesel spray via high speed visualization”. *SAE Paper* 920108, 1992.
- [88].Solbrig C. E., Litzinger T.A., “The effect of intake charge temperature on combustion and emissions in an optically accessible di diesel engine with and without swirl”. *SAE Paper* 902060, 1990.
- [89].Pickett L., Siebers D., “Soot in diesel fuel jets: effects of ambient temperature, ambient density, and injection pressure”. *Combustion and Flame*, Vol. 138, pp.114–135, 2004.
- [90].Kuti O., Zhang W., Nishida K., Wang X. et al., “Effect of Injection Pressure on Ignition, Flame Development and Soot Formation Processes of Biodiesel Fuel Spray”. *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, Vol: 3(2), pp.1057-1070, 2010.
- [91].Molina S.A., “Estudio de la influencia de los parámetros de inyección y la recirculación de gases de escape sobre el proceso de combustión, las prestaciones y las emisiones de un motor Diesel de 1.8 litros de cilindrada”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2003.
- [92].Dec J. E., “A conceptual model of DI diesel combustion based on laser sheet imaging”. *SAE Paper* 970873, 1997.
- [93].Peters N., *Turbulent Combustion*, Cambridge University Press, 2000.
- [94].Dec J. E., Coy E. B., “Radical OH imaging in for DI diesel engine and the structure of the early diffusion flame”. *SAE Paper* 960831, 1996.

- [95].Dec J. E., Canaan R. E., "PLIF imaging of NO formation in for DI diesel engine". *SAE Paper* 980147, 1998.
- [96].Meijer M., Malbec L. M., Bruneaux G., Somers L. M. T., "Engine Combustion Network: Spray A basic measurements and advanced diagnostics". *ICLASS*, 2012.
- [97].Knox B., Genzale C., Pickett L., Garcia-Oliver J. et al., "Combustion recession after end of injection in diesel sprays". *SAE Int. J. Engines*, vol. 8(2), pp: 679-695, 2015.
- [98].Bruneaux G., "Combustion structure of free and wall-impinging diesel jets by simultaneous laser-induced fluorescence of formaldehyde, poly-aromatic hydrocarbons, and hydroxides". *Int. J. Engine Res.*, Vol. 9, pp. 249-265, 2008.
- [99].Kosaka H., Aizawa T., Kamimoto T., "Two-dimensional imaging of ignition and soot formation processes in a diesel flame". *Int. J. Engine Res.*, Vol. 6, pp. 21-42, 2005.
- [100]. Pickett L.M., Siebers D.L., "Soot formation in diesel fuel jets near the lift-off length". *Int. J. Engine Res.*, Vol. 7, pp. 103-130, 2006.
- [101]. Musculus M., Pickett L. "Diagnostic considerations for optical laser-extinction measurements of soot in high-pressure transient combustion environments". *Combustion and Flame*, Vol. 141(4), pp. 371-391, 2005.
- [102]. Zhao H. Ladommatos, "Optical diagnostics for soot and temperature measurement in diesel engines". *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 24, pp. 221-255, 1998.
- [103]. Matsui Y., Kamimoto T., and Matsuoka S., "A study on the application of the two-color method to the measurement of flame temperature and soot concentration in diesel engines". *SAE Paper* 800970, 1980.
- [104]. Payri F., Pastor J. V., García J. M., Pastor J. M. "Contribution to the application of two-colour imaging to diesel combustion". *Meas Sci. Technol.*, Vol (18), pp. 2579-2598, 2007.
- [105]. Pastor J., García J., Pastor J., Buitrago J., "Analysis methodology of diesel combustion by using flame luminosity, two-colour method and laser-induced incandescence". *SAE Paper* 2005-24-012, 2005.
- [106]. Singh S., Reitz R., and Musculus M., "2-Color thermometry experiments and high-speed imaging of multi-mode diesel engine combustion". *SAE Paper* 2005-01-3842, 2005.
- [107]. Musculus M., Singh S., Reitz R., "Gradient effects on two-color soot optical pyrometry in a heavy-duty DI diesel engine". *Combustion and Flame*, Vol. 153(1-2), pp. 216-227, 2008.
- [108]. Zha K., Yu X., Jansons M., "Simultaneous high-speed two-color thermometry and laser-induced incandescence soot measurement in a small-bore optical engine fueled with JP-8". *ASME 2012 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, ICEF2012-92100, pp. 313-326, 2012.
- [109]. Kobayashi H., Kamimoto T., Matsuoka S., "A photographic and thermodynamic study of diesel combustion in a rapid compression machine". *SAE Paper* 810259, 1981.

-
- [110]. Zapata D., “Caracterización de los procesos de inyección-combustión Diesel mediante visualización y procesado digital de imágenes”. *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2010.

Capítulo 3

Materiales y Experimentación

Contenido

3.1. Introducción	61
3.2. Caracterización de la inyección	62
3.2.1. Toberas y geometrías	62
3.2.2. Combustibles y caracterización hidráulica	63
3.3. Instalaciones experimentales	71
3.3.1. Motor óptico.....	71
3.3.2. Instalación de presión, temperatura y flujo constante.....	73
3.3.3. Estimación de condiciones de operación	76
3.4. Técnicas de visualización de chorros/llamas de inyección directa	79
3.4.1. Mie-scattering	79
3.4.2. Visualización schlieren	83
3.4.2.1. Adaptación a chorros reactivos.....	86
3.4.2.2. Arreglos ópticos.....	87
3.4.2.3. Procesado de imágenes	90
3.4.3. Quimioluminiscencia de OH*.....	91
3.4.4. Radiación de amplio espectro	92
3.5. Modelado 1-D de mezclas de chorros de inyección directa	93
3.6. Evaluación del chorro inerte en los entornos experimentales usados	95
3.7. Conclusiones	102
3.8. Referencias	102

3.1. Introducción

Una vez que se ha descrito el contexto teórico que enmarca la investigación desarrollada en este trabajo, a lo largo de este capítulo se describen el entorno experimental y aquellos procesos/metodologías que ayudan al entendimiento de los principales resultados desarrollados en los capítulos 4 y 5 que dan respuesta a las principales cuestiones planteadas como temática de investigación.

En los próximos apartados se definen en primera instancia los escenarios que describen la experimentación realizada, en los que se detallan las medidas realizadas y su aporte específico al estudio. Partiendo de una variación paramétrica típica de estudios de chorros/llamas, se han definido tres diferentes grupos de ensayos: (1) Estudios de chorros en condiciones inertes, (2) estudio de chorros en condiciones reactivas y (3) estudios de chorros dentro del marco de investigación del Spray-A definido por la *Engine Combustion Network (ECN)*. Como podrá observar el lector, los grupos anteriores se describen en orden inverso para dar un hilo conductor a los procedimientos descritos en este capítulo.

Para la consecución de tal experimentación, se describen las toberas y su caracterización hidráulica para cada uno de los combustibles usados en el estudio. Seguidamente, se describen las dos instalaciones experimentales que se han usado a lo largo de este trabajo, de las cuales se detallan sus capacidades operativas y la estimación de las condiciones de operación definidas para esta investigación. Además, se da cuenta de los materiales ópticos, técnicas de visualización y métodos de experimentación empleados en aras de describir la evolución transitoria de llamas Diesel. Además, se definen las principales características del modelado unidimensional de mezclas aire/combustible de inyección directa que ayudarán a la interpretación de los resultados mostrados en el capítulo 4. Finalmente, se aborda una comparativa de parámetros macroscópicos de chorros y llamas Diesel obtenidos en ambas instalaciones experimentales con la finalidad de establecer el mejor entorno para la definición de la evolución de chorros/llamas transitorias. A excepción de lo referido a la técnica de termometría de dos colores, que se analiza con más detalle en el capítulo 5, en las próximas secciones se da cuenta de los materiales usados en el desarrollo del estudio, dando especificidad a las instalaciones experimentales y sus capacidades operativas.

3.2. Caracterización de la inyección

Aunque en este trabajo se enfatiza sobre la evolución de llamas Diesel desde un punto vista óptico, impera la necesidad dar cuenta de las características propias de los sistemas de inyección usados en el desarrollo experimental. De esta manera, los parámetros fundamentales de caracterización del sistema de inyección, proporcionarán elementos de entendimiento de los procesos observados en el diagnóstico óptico, de acuerdo con los resultados de la literatura.

3.2.1. Toberas y geometrías

Se han usado tres sistemas de inyección diferentes en condiciones singulares de diámetro de tobera a continuación descritas. Estos comparten elementos característicos como la bomba de combustible, el sistema de common-rail y actuador de tipo solenoide en cada uno de los inyectores. Si bien los inyectores no son exactamente iguales, la parte decisiva para la evolución del chorro inyectado será la tobera, con lo que su denominación se hará en base a este elemento.

El primero de ellos, llamado a partir de ahora **Tobera A** está relacionada a experimentos realizados bajo las condiciones de contorno del Spray-A adoptados por la ECN [1,2]. El inyector A, es un inyector Bosch CRIP 2.4 del tipo micro-saco, equipado con una tobera mono-orificio axi-simétrica con un diámetro de 89 μm que ha sido determinado bajo microscopía electrónica de moldes de silicona acorde a los procedimientos descritos en [3]. De tales medidas se desprende un factor de conicidad de 1.8, que descarta efectos de cavitación durante el proceso de inyección y por ende, cualquier limitación en el desarrollo de la mezcla aire-combustible. El segundo de ellos, **Tobera B**, es un inyector Bosch del tipo micro-saco, equipado con una tobera axi-simétrica de 138 μm y con un factor de conicidad de 2.9. Por último, **Tobera C**, es un inyector Bosch equipado con tobera axi-simétrica de 82 μm y conicidad de 1.8, características determinadas a partir de los procedimientos descritos en [3,4].

Potencialmente, en los inyectores equipados con toberas mono-orificio se observan comportamientos que no aparecen en las multi-orificio, tal como enumera Nerva en [5]. Algunos son: mayor incremento de presión en el micro-saco, mayor rapidez del levantamiento de aguja o mayor presión de inyección en condición de máximo levantamiento. Sin embargo, en estudios fundamentales tales como el desarrollado en esta tesis, existen riesgos potencialmente más perjudiciales en toberas multi-orificio para el análisis, producto de la singularidad de las técnicas ópticas en uso y el efecto que la interacción entre chorros pueda ocasionar sobre la

evolución de parámetros como la penetración, ángulo de chorro o radiación captada por elementos receptores como cámaras de visualización. Bajo estas premisas se han seleccionado las toberas previamente descritas.

3.2.2. Combustibles y caracterización hidráulica

Tal como se resume en la *Tabla 3.1*, se han empleado tres combustibles diferentes a lo largo de este estudio. El primero de ellos, n-Dodecano está relacionado exclusivamente con los estudios que forman parte del Spray-A definido en ECN. Mientras que los dos restantes, Diesel comercial y n-Heptano se emplean en estudios comparativos entre las dos instalaciones experimentales empleadas, tal como se ha descrito en la *Figura 1.4*.

Propiedades	Diesel	n-Heptano	n-Dodecano
Formula Química Equivalente	$C_{17.1}H_{36.0}^1$	C_7H_{16}	$C_{12}H_{26}$
Aromáticos	25.30% ¹	0%	0%
Poli-aromáticos	4% ¹	0%	0%
Poder Calorífico Inferior [MJ/kg]	44.27 ¹	44.6 ²	45.5 ⁴
Número de cetano	54 ¹	56.3 ²	88 ³
Densidad a 288 K [kg/m ³]	833 ¹	684 ²	750 ⁴
Viscosidad cinemática a 313 K, ν [mm ² /s]	2.5 ¹	0.51 ²	3.14 ⁴

Tabla 3.1.- Propiedades de combustibles. Datos rescatados de literatura: ¹ [5], ² [6], ³ [7] y ⁴ [8].

Si bien la naturaleza de los combustibles n-Heptano y n-Dodecano es sintética, las propiedades químicas relacionadas con el proceso de mezcla y de auto-encendido son características similares a las de un Diesel de carácter comercial. El proceso de inyección y características principales del mismo pueden verse afectadas por parámetros típicos de la dinámica de fluidos como la viscosidad cinemática del mismo definida en la *Tabla 3.2*. Si bien este trabajo no se enmarca en el ámbito de estudio y caracterización de combustibles, sí trata los combustibles

sintéticos como elementos simplificadores del estudio de mezcla en modelos de chorros por su carácter mono-componente.

En el ámbito del marco global de experimentación aquí presentado es taxativa la presentación de todas las herramientas usadas, por más de que esta no sea una herramienta singular de este estudio. En ese sentido el n-Dodecano esta englobado dentro del spray-A para lo cual la ECN define además del combustible (ver *Tabla 3.2*), el tiempo de energización, presión de inyección, temperaturas del combustible entre otros. Por ello, se ha publicado una información amplia sobre la dependencia de parámetros indicadores del comportamiento del proceso de inyección en [9] y que resulta redundante presentar en este documento.

Singularidades del ensayo	Spray-A
<u>Condiciones de Inyección</u>	
Presión de Inyección,[MPa]	50*, 100* , 150
Combustible	n-Dodecano
Temperatura de combustible en la tobera, [K]	363
Common rail – Volumen/longitud	22 cm ³ /28 cm
Medida de presión de rail	A 7 cm de la entrada del
Duración de la inyección, [ms]	4*
<u>Condiciones Ambientales</u>	
Temperatura del Aire, [K]	750*/800*/850*/900
Densidad del aire, [kg/m ³]	22.8
Concentración de Oxígeno, [%]	15

Tabla 3.2.- Definición del ensayo del Spray-A definido por la ECN [1,2].

(*) Variación paramétrica incluida en el estudio.

Lo que sí es específico de este trabajo es la utilización de combustibles Diesel y n-Heptano aplicados a estudios con las toberas B y C. Para ello a lo largo de estudio aquí presentado la energización se ha mantenido constante en 4 ms, que si bien no es representativa de tiempos de energización de inyectores de

producción, resulta útil para estudios fundamentales sobre procesos de combustión tal como se ha afrontado recurrentemente en diferentes estudios de investigación dentro del grupo CMT-Motores Térmicos [10-12], al igual que en diferentes referencias dentro del campo de diagnóstico óptico.

Referido a la tasa de combustible inyectado, se ha hecho uso de equipamiento de la empresa Bosch [13] destinado a tal medida tomando en cuenta todas las consideraciones, procedimientos y metodologías descritas en [4,14]. En consecuencia, lo que aquí se presenta es un resumen del proceso, en conjunto con la interpretación de los resultados.

Básicamente, el combustible es inyectado en un tubo presurizado (normalmente con Nitrógeno) a niveles de los pretendidos alcanzar en el desarrollo del estudio planteado. Donde la descarga de combustible produce un incremento de presión proporcional al incremento de masa de combustible, del cual se extrae a través de la *ecuación 1* el flujo de masa de combustible en función de la relación de Allevi para fluidos estacionarios:

$$\dot{m} = \frac{A_t \cdot \Delta P}{a} \quad (3.1)$$

donde, A_t es el área transversal del tubo, ΔP es el incremento de presión descargada respecto a la estacionaria del tubo y a es la velocidad del sonido alcanzada por el combustible. Recientemente, en la literatura existen estudios que enfocan la dependencia de la velocidad del sonido respecto de la temperatura del combustible y la presión de inyección, lo cual se traduce como advierte la *ecuación 3.1* en variaciones de la tasa de combustible inyectada. Tal como concluye Bracho [15] la variación de las temperaturas del combustible en ambientes de motor y a las altas presión dentro de la cámara de combustión potencialmente introducen un error que varía entre el 10% y 20% para la medida de tasa de combustible, atendiendo a los datos experimentales de cinco combustibles diferentes. Desafortunadamente, tales relaciones empíricas no consideran combustibles como el n-Heptano, por lo que dentro del contexto del estudio de combustión en este trabajo presentado no se adoptan tales consideraciones.

En la parte superior de la *Figura 3.1* se muestra la evolución de la tasa de inyección para el nivel medio de presión inyección de la variación descrita en la *Tabla 3.3*, y que es representativo de las máximas diferencias observadas bien por variación del diámetro de tobera o de la presión de inyección. En la figura, la

medida de tasa de inyección se ha registrado una frecuencia de adquisición de 100 kHz. En ella, se puede apreciar un retraso hidráulico característico desde el

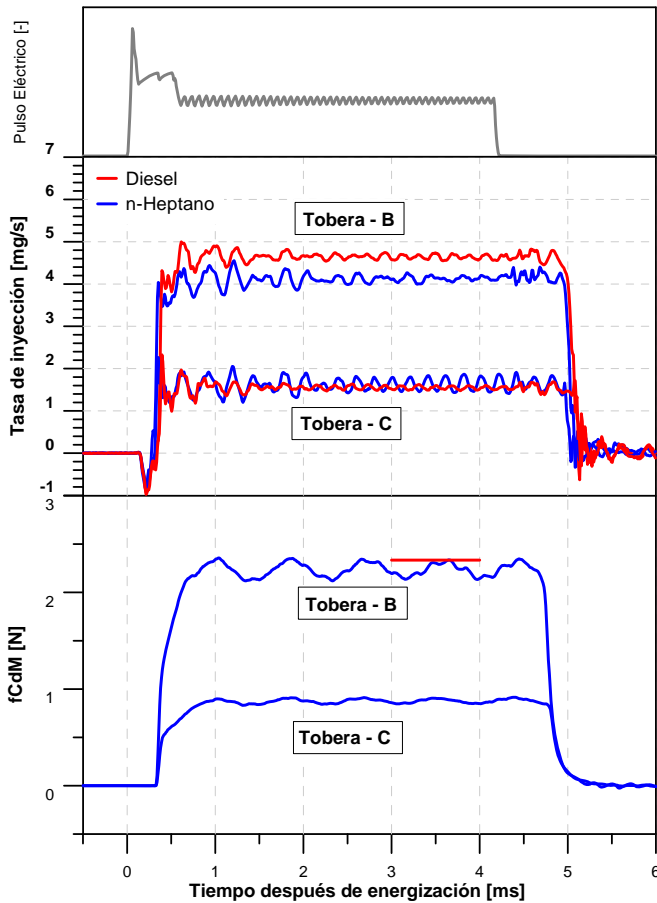


Figura 3.1.- Evolución de tasa de inyección y flujo de cantidad de movimiento de toberas mono-orificio del estudio. $P_{iny}=100$ MPa. Contrapresión 5.5 MPa. Valores de $fCdM$ del Diesel se han tomado del trabajo de Gimeno [4] y Nerva [5] para las toberas B y C respectivamente.

comando de pulso eléctrico en el inyector hasta la detección de una tasa inyectada en el medidor. Resulta característico de este trabajo un retraso de alrededor 250-350 μ s y que se incrementa según aumenta de la presión de inyección en concordancia con lo encontrado en la literatura [16,17]. En cuanto a la evolución temporal de la tasa de inyección resulta evidente una influencia del diámetro de tobera en los valores cuasi-estabilizados de la misma. Al comparar ambos combustibles, se observa una diferencia no superior al 11% en el valor promedio de la ventana temporal entre 3 ms y 4ms, diferencias que pueden asociarse a

variaciones en la velocidad del sonido y una menor la densidad del n-Heptano, que resultan en una menor tasa de inyección tal como se advierte en la literatura con combustibles sustitutivos del Diesel comercial [14].

Referido al flujo de cantidad de movimiento $fCdM$, se han llevado a cabo ensayos en una instalación desarrollada con este propósito [18]. Esta instalación también es presurizada con nitrógeno en niveles constantes (similares al de cámara de combustión) y la medida es registrada por un sensor de presión piezo-eléctrico. Este, ubicado a 5 mm de la punta de la tobera de inyección es lo suficiente ancho para coleccionar todo el chorro de inyección. Bajo la hipótesis de conservación de cantidad de movimiento el sensor registra una fuerza equivalente a la existente en el orificio de salida.

Parámetros de Inyección	
Presión de Inyección, [MPa]	50, 100 , 150
Combustible	Diesel y n-Heptano
Temperatura de combustible en la tobera, [K]	363
Duración de la inyección, [ms]	4 ms
Contrapresión en maquetas de caracterización hidráulica, [MPa]	4.3/5.5/7

Tabla 3.3.- Parámetros de inyección considerados para la caracterización hidráulica y desarrollo del estudio comparativo entre instalaciones.

La parte inferior de la **Figura 3.1** muestra la evolución temporal de $fCdM$ donde desafortunadamente no es posible incluir medidas relacionadas con el Diesel en primer lugar debido a la poca importancia en el análisis sucesivo de la evolución transitoria del proceso de inyección y segundo a incompatibilidad organizativa para llevar a cabo las medidas. No obstante, tal como se advierte en la figura, rescatando información del trabajo realizado por Gimeno [4], para la Tobera B es posible dar información promedio de $fCdM$. En el caso de la tobera C, también es posible dar información acerca del $fCdM$ rescatados del trabajo desarrollado por Nerva [5] con combustible y niveles de presión inyecciones iguales a los de este estudio.

El conjunto de mediciones se resumen en la **Figura 3.2**, en la que se da cuenta del promedio de la tasa de inyección y la cantidad de movimiento en la ventana temporal donde se ha considerado el flujo cuasi-estacionario que corresponde entre 3 y 4 milisegundos después del inicio de inyección. Una vez más las observaciones comentadas previamente sobre las diferencias en tasas de inyección son evidentes

para los niveles de presión de inyección mostrados, y a su vez contrasta la evidencia en la literatura de un crecimiento tanto de la tasa de inyección como la cantidad de movimiento (medido únicamente para el n-Heptano) como consecuencia de un presión de inyección más alta [14-18]. El efecto de la contrapresión similar a las evaluadas en condiciones de motor se ha determinado menor al 2% para niveles de 4,2 MPa y 7.2 MPa lo que no supone una desviación mayor a la típica encontrada en el análisis previamente abordado. En la **Figura 3.2**, se observa que las estimaciones del $fCdM$ del Diesel divergen comparadas a las del n-Heptano en mayor proporción, para el nivel más alto de presión de inyección (150 MPa). Sin embargo, no hay que dejar de lado el hecho de que la evaluación de Nerva [5] se ha hecho con una mayor energización del inyector (8 milisegundos), y por lo tanto el comportamiento del inyector presumiblemente es culpable de las diferencias observadas entre ambos combustibles.

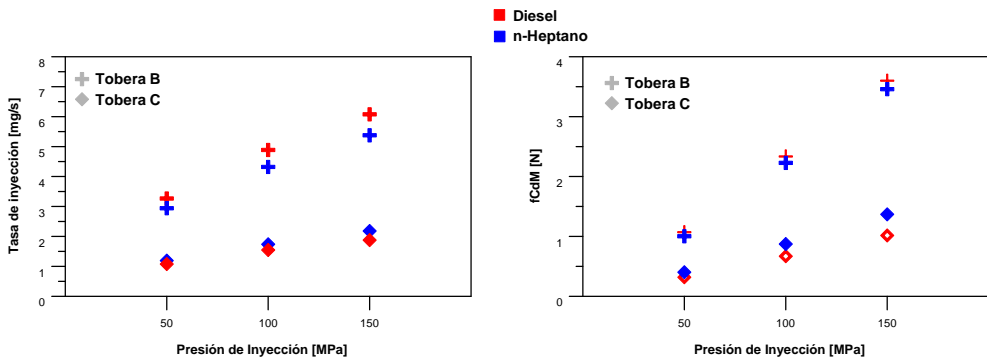


Figura 3.2.- Valores promedios de medidas tasa de inyección y $fCdM$. Las medidas de $fCdM$ relacionadas con Diesel se han tomado del trabajo de Gimeno [4] en el caso de la tobera B, y del trabajo de Nerva [5] para la tobera C.

Se ha abordado el cómputo de parámetros que determinan las características hidráulicas de las toberas en cuestión acorde a la metodología descrita en [19]. A partir de las mediciones de tasa inyección y cantidad de movimiento (estimadas en el caso del Diesel), en conjunto con el desarrollo teórico de las ecuaciones 3.2, 3.3 combinadas en 3.4 se da respuesta al coeficiente de velocidad (C_v) que relaciona la velocidad real respecto a la proveniente de la ecuación de Bernoulli.

$$\dot{m}_{efec} = u_{efec} \cdot \rho_f \cdot A_{efec} \quad (3.2)$$

$$\dot{M}_{\text{efec}} = u_{\text{efec}}^2 \cdot \rho_f \cdot A_{\text{efec}} \quad (3.3)$$

$$u_{\text{efec}} = C_v \cdot U_0 = C_v \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{\text{iny}} - P_0)}{\rho_f}} \quad (3.4)$$

A posteriori la resolución de la ecuación 3.5 habilita dar interpretación a los cambios en el flujo del área efectiva de paso, relacionada con la teórica a través del coeficiente de área (C_a). Dicho coeficiente da cuenta de la restricción en la sección de paso de combustible y por ende en una variación de los perfiles de velocidad a la salida de la tobera lo que da cabida a efectos de cavitación relacionados con un incremento del número de Reynolds y un decremento del C_a . Finalmente, se puede relacionar los coeficientes C_v y C_a al coeficiente de descarga C_d que resulta de lo solución de la ecuación 3.6 o con el coeficiente de momento C_m de la ecuación 3.7.

$$A_{\text{efec}} = C_a \cdot A_0 \quad (3.5)$$

$$\dot{m}_f = C_v \cdot C_a \cdot A_0 \sqrt{2\Delta P \rho_f} = C_d \cdot A_0 \sqrt{2\Delta P \rho_f} \quad (3.6)$$

$$\dot{M}_f = C_v^2 \cdot C_a \cdot A_0 \cdot 2\Delta P = C_M \cdot A_0 \cdot 2\Delta P \quad (3.7)$$

Abordada la solución analítica de las ecuaciones 3.2 a 3.7, los resultados de los coeficientes hidráulicos de las toberas B y C se observan en la **Figura 3.3**. Es destacable en primera instancia, las diferencias en las características del flujo entre el Diesel y n-Heptano en la representación característica de los coeficientes en función del número de Reynolds. La viscosidad cinemática del n-Heptano (aproximadamente 5 veces inferior que la del Diesel) induce a regímenes de flujo con un número de Reynolds sensiblemente mayores a los típicos de una inyección con Diesel como combustible.

Bajo tal característica, el comportamiento de la inyección de n-Heptano se puede entender propensa a la cavitación dado la poca adherencia del combustible a las paredes de inyector y un desprendimiento de la capa límite puede inducir a limitación en la sección de paso de combustible que podría interpretarse de la disminución del coeficiente de área C_a en la **Figura 3.3** para ambas toberas de inyección. No obstante, la cavitación no se sustenta en el cómputo del coeficiente

de velocidad C_v y de descarga C_d , ya que se puede observar un crecimiento del factor como consecuencia del grado de turbulencia del flujo (mayor $\# Re$) característico de toberas no-cavitantes. Por su parte, el coeficiente de momento C_m sustenta las observaciones de la *Figura 3.2* según aumenta el número de Reynolds. Mientras que en la comparativa entre combustibles y toberas resulta importante destacar las diferencias en C_m y por lo tanto en la mezcla, en las que un mayor diámetro de tobera (Tobera B) aumenta el coeficiente de momento cuando es el Diesel el combustible inyectado, mientras que en el n-Heptano la tendencia se invierte debido a que el C_a es mayor en la tobera C.

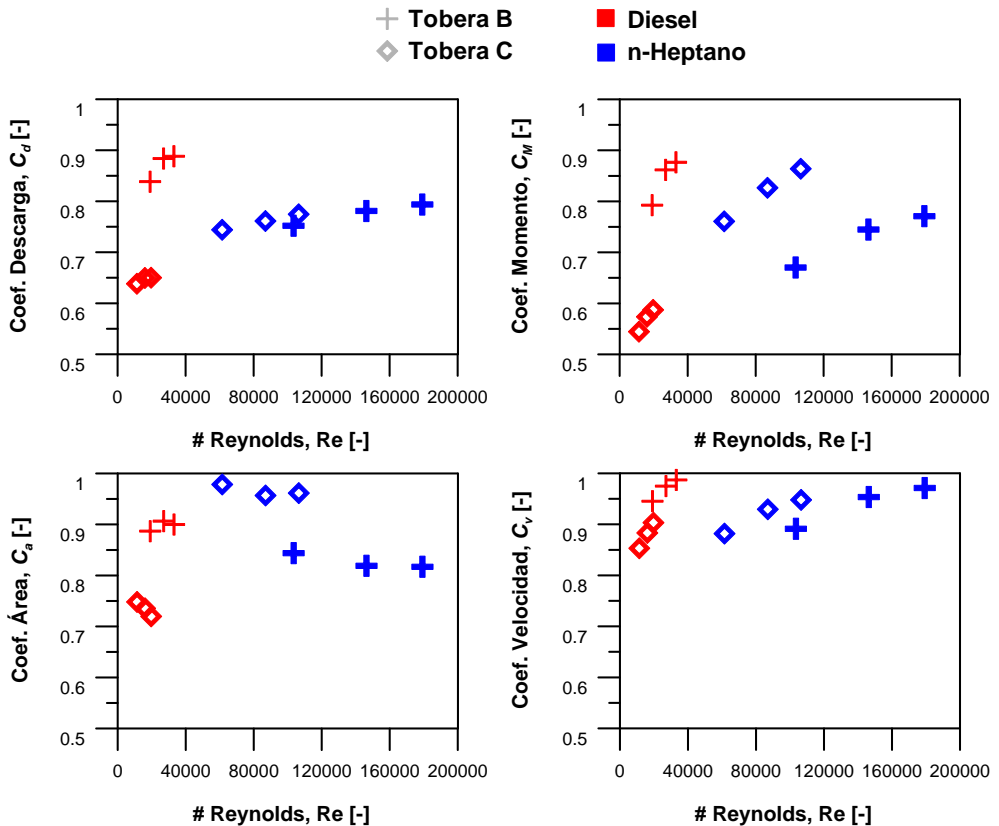


Figura 3.3.- Coeficientes resultantes de la caracterización hidráulica de toberas B y C en función del número de Reynolds. Los símbolos resaltados corresponden a medidas que forman parte de este estudio, el resto corresponden a cálculos que incluyen $fCdM$ tomados de [4] para la Tobera B y [5] para la Tobera C.

3.3. Instalaciones experimentales

3.3.1. Motor óptico

El desarrollo experimental transcurre en primera instancia en una instalación desarrollada para el estudio básico del proceso de combustión de inyección directa, de la cual se puede encontrar una descripción extensa en el trabajo de Bermúdez [20]. La instalación consta de un motor de dos tiempos desarrollado por AVL-List con una potencia de 37 kW, de cuales se pueden encontrar sus características fundamentales en la *Tabla 3.4*. El carácter óptico de la instalación viene dado por la capacidad de instalar cámaras de combustión fabricadas con el propósito de estudiar toberas multi-orificio, así como también las mono-orificio descritas en la sección 3.3.1. En este último caso, tal como se muestra en la *Figura 3.4* el motor se equipa con una cámara de combustión que dota a la instalación de una relación de compresión geométrica de 14.5:1 que se opera a una velocidad constante de 500 rpm.

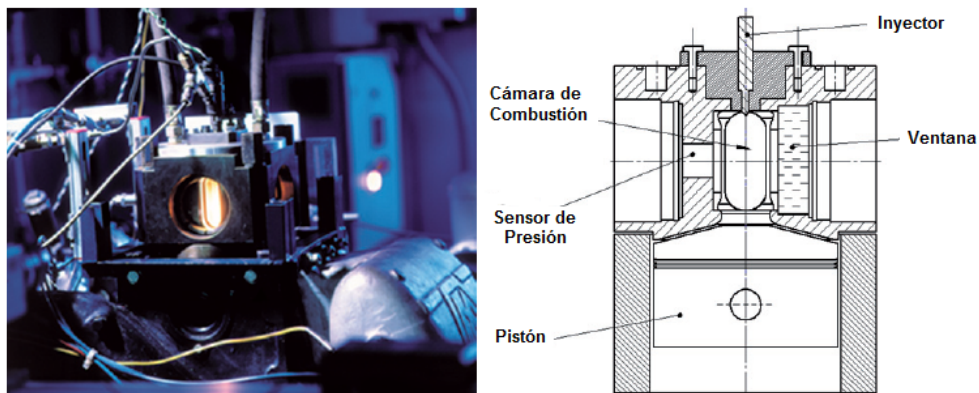


Figura 3.4.- Motor óptico. Cámara de combustión para estudio de toberas mono-orificio

En la configuración óptica para estudios de toberas mono-orificio, provee de tres accesos ópticos al desarrollo del chorro/llama Diesel del inyector que se localiza en la parte superior de la cámara combustión, lo cual permite explotar la máxima longitud de visualización provista por los accesos (los 87.8 mm de la longitud máxima en la *Tabla 3.4* se ven reducidos por los sistemas de sujeción y juntas de acople de las ventanas a la cámara de combustión hasta los 78 mm). Mientras que el cuarto acceso que permanece opaco, se equipa con un sensor de presión refrigerado para registrar la presión dentro de la cámara de combustión.

Provista de termo-resistencias y compresores volumétricos de gran tamaño, la instalación es capaz de regular la temperatura y presión del gas que es conducido a la admisión del motor. Bajo estas condiciones, el gas de admisión puede ir desde aire para estudios fundamentales de combustión [21] (ambiente reactivo) pasando por la admisión de nitrógeno para estudios de los procesos de mezcla en ausencia de combustión (ambiente no-reactivo) [5,23,24]. Incluso con la recirculación de gases de escape en la admisión, se realizan investigaciones relacionadas con la influencia de la tasa de EGR en el proceso de combustión (ambiente reactivo) [25,26].

Finalmente, la instalación es provista de un sistema de inyección independiente que consta de una bomba de baja presión, common-rail y una línea de alta presión de inyección conectada al inyector. Mediante un sistema de sincronización externo a través de la determinación del PMS del motor, se ubica el inicio de la energización del inyector en el ángulo de giro deseado. Además con este sistema externo, se establece una frecuencia de inyección lo suficientemente baja (0.42 Hz) que limita el enfriamiento de la mezcla atrapada en la cámara de combustión, lo cual se refleja en la estimación de temperaturas dentro de la cámara de combustión y en los ciclos de motor necesarios para recuperar el estado inicial previo a la inyección en cuanto a presión y temperatura, detalles del proceso se pueden ampliar en [5].

Motor óptico	
Tipo	Mono cilíndrico de dos tiempos
Desplazamiento	3000 cm ³
Carrera del pistón	170mm
Diámetro del cilindro	150mm
Distancia entre la punta de tobera y la cabeza del pistón en PMS	87.8 mm
Relación de compresión geométrica	14.5:1

Tabla 3.4.- Características constructivas del motor óptico.

3.3.2. Instalación de presión, temperatura y flujo constante

En contraparte al motor óptico, esta instalación es un volumen abierto en el que tal como su nombre lo indica, se regulan tanto la presión, temperatura del gas y la velocidad del flujo a la entrada del mismo. La instalación tipificada por su nombre y acrónimo en inglés “*Constant Pressure Flow, (CPF)*” está diseñada constructivamente de acuerdo con el esquema y arreglo rescatado del trabajo de Bardi [27] que se muestra en la *Figura 3.6* y sus características más importantes se enumeran en la *Tabla 3.5*.

De manera global el funcionamiento de la instalación es similar a la del motor óptico en cuanto a la preparación del gas, previo a llevarse al volumen donde finalmente es inyectado el combustible. Y es que, dos grandes compresores volumétricos y una resistencia de 30 kW de potencia son los responsables de aumentar la presión y la temperatura del gas hasta un máximo 15 MPa y 1000 K, respectivamente. En tales condiciones, el gas fluye desde la parte inferior de la cámara de combustión hasta la zona donde el combustible es inyectado. El arreglo óptico de esta instalación permite el estudio de toberas mono-orificio a través de las ventanas de visualización ortogonales al plano del eje del inyector, permitiendo explotar un máximo de 105 mm de visualización del chorro (los 128 mm de diámetro de ventana en la *Tabla 3.5* se ven reducidos por los sistemas de sujeción y juntas de acople a la cámara de combustión). El gran valor añadido de esta instalación, además de aumentar los rangos de evaluación de condiciones de motor, está en la baja velocidad de flujo de gas dentro del volumen de la cámara de combustión que permite eliminar los efectos que induce el movimiento del aire sobre el desarrollo del chorro Diesel.

Maqueta CPF	
Tipo	Flujo a presión constante
Diámetro de la cámara de combustión	200 mm
Altura de la cámara de combustión	250 mm
Diámetro de ventana	128 mm
Máxima presión	15 MPa
Máxima Temperatura de gas	1000 K
Velocidad de flujo	< 0.3 m/s

Tabla 3.5. - Características constructivas de la maqueta CPF

La instalación también permite realizar estudios fundamentales en ambientes tanto no-reactivos como reactivos dada la posibilidad de utilizar como gas nitrógeno y aire puro, respectivamente. Mientras que para la evaluación de tasas de EGR, la cantidad objetivo de oxígeno en el ambiente se reproduce de manera sintética mezclando aire/nitrógeno que circula a través de la instalación y monitorizada a través de medidas de un sensor de la concentración de oxígeno ubicado en el circuito utilizado para tal fin.

En cuanto al control de las condiciones ambientales objetivo, es importante resaltar el proceso de regulación de temperatura del gas en el volumen de la cámara de combustión. Y es que en un volumen de grandes dimensiones resulta fundamental su regulación para evitar no-homogeneidades de la misma ya que como se ha descrito en [28,29] repercute directamente en la medida y entendimiento de los parámetros ópticos de interés de cualquier estudio de combustión.

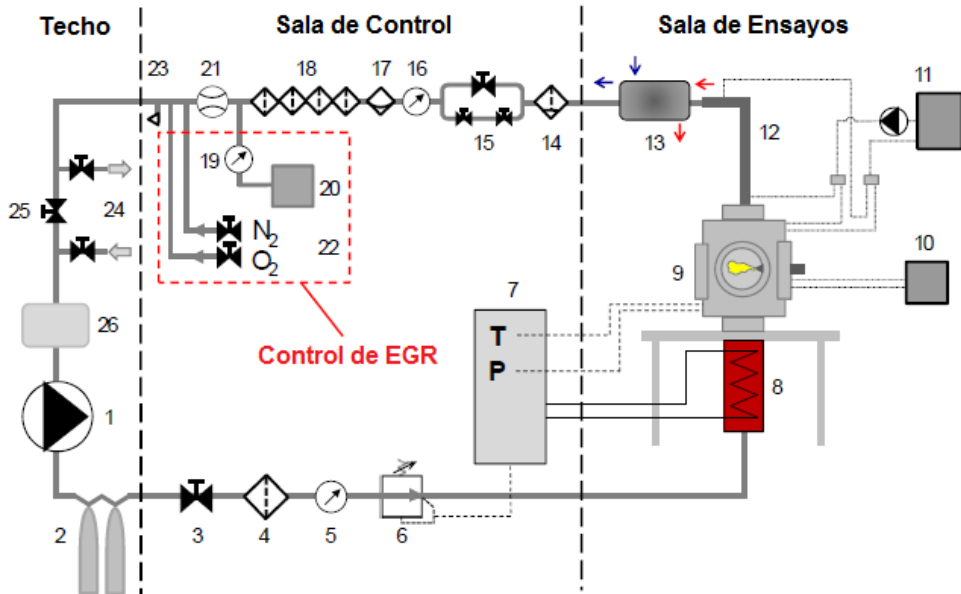


Figura 3.5.- Esquema de la maqueta CPF [27]. Principales componentes en arreglo coincidente con el flujo de gas. 1) compresor de aire, 2) tanques de alta presión, 3) válvula principal, 4) filtro de alta presión, 5) manómetro de presión 6) regulador de presión 7) unidad de control 8) Calentador principal, 9) cámara de combustión, 10) sistema de refrigeración del inyector, 11) sistema de enfriamiento de la instalación, 12) intercambiador de calor, 13) intercambiador de calor 14) filtro de alta presión con drenaje, 15) válvula de regulación de flujo, 16) manómetro de presión, 17) filtro ciclónico, 18) grupo de 4 filtros de baja presión 19) manómetro de presión, 20) sensor de O₂, 21) medidor de flujo, 22) mezcla de oxígeno y nitrógeno, 23) drenaje, 24) válvula de apertura del circuito exterior, 25) válvula de apertura del circuito, 26) tanque de baja presión.

Aunque el panel de control de la instalación defina una temperatura objetivo del gas en la celda, el control de la potencia entregada por la termo-resistencia viene dado por la medición de la temperatura en un volumen de control con tres termopares de distinto diámetro que mediante un algoritmo implementado por el fabricante establece la temperatura objetivo. La acritud de este procedimiento ha sido corroborado en estudios previos donde la temperatura objetivo se ha comparado con medidas de termopares ubicados en distintos puntos de medición a lo largo tanto del eje de inyección, como del volumen de la cámara, si bien se puede decir que las diferencias pueden ser de hasta +10 K respecto a la temperatura objetivo, se invita al lector a consultar los detalles de la metodología comparativa y resultados obtenidos en [28].

Es importante resaltar que la instalación dispone de un circuito de enfriamiento de dos etapas conectado a un remanso externo con líquido refrigerante sub-enfriado. En la primera etapa, para garantizar las restricciones impuestas por el fabricante, la temperatura del gas se mantiene siempre inferior a 150°C. En la segunda etapa, aguas abajo del primer intercambiador, la temperatura del gas se reduce hasta a los 40°C, previo a ser liberada al ambiente. Por otro lado, debido al potencial de transferencia de calor entre la cámara de combustión (700-1000 °C) y el ambiente en la sala donde se encuentra ubicada (25-30°C), alrededor la pared interna de la instalación dispone de una resistencia de 3 kW potencia que se mantiene activa durante su funcionamiento, limitando el potencial de transferencia de calor hacia el exterior de la cámara. Por último, las pérdidas por transferencia de calor son consideradas también en el flujo de gas caliente en la zona ubicada entre el calentador principal y la entrada de la cámara de combustión. En este sentido, para reducir la no-homogeneidad de la temperatura en el flujo en la entrada de la cámara, se mantiene activo durante la campaña de ensayos un segundo calentador de 3.5 kW de potencia ubicado en este punto.

Debido a las altas temperaturas a las que se ve sometida la punta del inyector, que a diferencia con el motor óptico se ve sometida de manera continua a temperaturas altas cerca del orificio de inyección del mismo, es fundamental para evitar el daño permanente del inyector refrigerarle de manera continua durante cualquier ensayo. Para ello, el porta-inyector está dotado con un sistema de refrigeración para: (i) fomentar la transferencia de calor desde el inyector hacia el refrigerante, (ii) mantener el conjunto a una temperatura de funcionamiento segura y (iii) evitar un incremento excesivo de la temperatura del combustible al emplear bajas frecuencias de inyección. En ese sentido, la *Engine Combustion Network* ha dispuesto de una temperatura de 40 °C a la entrada del útil del inyector en aras de mantener una temperatura en la punta de la tobera de 90 °C de acuerdo a las mediciones que se pueden encontrar en [27]; donde se han obtenido temperaturas en la punta de la tobera en condiciones similares a las de este estudio por medio de

un inyector falso equipado con un termopar en lugar de la aguja del mismo. Esta condición se mantiene en los estudios aquí planteados, incluyendo los que no están enmarcados dentro del spray-A.

Finalmente, al igual que en el motor óptico, la instalación está dotada de un sistema de inyección independiente que permite controlar el la frecuencia de inyección, el tiempo de energización del inyector y la presión de inyección. Se ha establecido una frecuencia de inyección de 0.5 Hz. El interés de una frecuencia de inyección tan baja es fomentar el barrido de gases y productos de combustión desde la cámara hacia el exterior. De esta manera se evita la saturación dentro del volumen de la cámara, y se limita el enfriamiento del gas limpio que fluye previo a un nuevo proceso de inyección, tal como se ha comentado previamente para el motor óptico. Además, en el estudio de chorros reactivos, disminuye el ensuciamiento de las ventanas de visualización que por las características constructivas de la instalación resulta costosa para su limpieza a nivel de tiempo invertido.

3.3.3. Estimación de condiciones de operación

En los estudios realizados se ha considerado un abanico de condiciones de funcionamiento de motor, cinco específicamente, en procesos de inyección en atmósfera inerte (%O₂=0%) y de combustión sin recirculación de gases de escape (%O₂=21%). Si bien hacia el final de este apartado se definen las condiciones adoptadas en la maqueta CPF, el interés en este apartado se centra en la estimación de las condiciones de operación del motor óptico que por su configuración y funcionamiento resulta de interés mencionar.

Tal como se ha comentado en la sección 2.3 y 2.4, los efectos de densidad y temperatura del aire resultan fundamentales en la evolución de la mezcla previa, durante y luego del autoencendido, sobre parámetros como la longitud máxima de combustible líquido, la penetración de la fase vapor, el lift-off y/o indicadores de la temperatura y concentración de hollín. Es por ello que en la *Tabla 3.6* se resumen las configuraciones adoptadas para el estudio que incluyen tanto una evolución del efecto de la densidad y de la temperatura del aire en iso-condiciones del uno u otro respectivamente. Partiendo de unas condiciones centrales o nominales las condiciones **NO** se refieren a $T_{\text{aire}}=826\text{K}$ y $\rho_{\text{aire}}=22.6 \text{ kg/m}^3$, el barrido de temperatura comprende las condiciones **BT** y **AT** mientras que el barrido de densidades comprende las condiciones **BD** y **AD** de la *Tabla 3.6*.

Partiendo de un teórico proceso de compresión, resulta simple la definición de las condiciones de operación a través de las relaciones politrópicas que

relacionan la presión y temperatura dentro de la cámara de combustión con la masa atrapada dentro del cilindro. No obstante, en la realidad este proceso ideal debe contar con la capacidad de llenado del cilindro que por características de un motor de dos tiempos es propenso a un llenado incompleto del cilindro por cortocircuito durante el cruce de válvulas de admisión y escape, así como también producto de fugas a través de los segmentos del motor. Ambos procesos resultan determinantes en la masa atrapada dentro del cilindro y por lo tanto en la estimación de la presión y temperatura dentro del mismo.

Ensayo	Condiciones Admisión	Condiciones en PMS Motor óptico	Condiciones Maqueta CPF.
Nominal, NO	$P_{adm}=0.217$ MPa $T_{adm}=368$ K	$\rho_{aire}=22.6$ kg/m ³ $T_{aire}=826$ K	$\rho_{aire}=21.2$ kg/m ³ $T_{aire}=826$ K
Baja densidad, BD	$P_{adm}=0.180$ MPa $T_{adm}=368$ K	$\rho_{aire}=18.5$ kg/m ³ $T_{aire}=826$ K	$\rho_{aire}=17.8$ kg/m ³ $T_{aire}=826$ K
Alta densidad, AD	$P_{adm}=0.292$ MPa $T_{adm}=368$ K	$\rho_{aire}=29.2$ kg/m ³ $T_{aire}=826$ K	$\rho_{aire}=28.4$ kg/m ³ $T_{aire}=826$ K
Baja temperatura, BT	$P_{adm}=0.202$ MPa $T_{adm}=342$ K	$\rho_{aire}=22.6$ kg/m ³ $T_{aire}=778$ K	$\rho_{aire}=21.2$ kg/m ³ $T_{aire}=778$ K
Alta temperatura, AT	$P_{adm}=0.234$ MPa $T_{adm}=394$ K	$\rho_{aire}=22.6$ kg/m ³ $T_{aire}=870$ K	$\rho_{aire}=21.2$ kg/m ³ $T_{aire}=870$ K

Tabla 3.6.- Definición de las condiciones termodinámicas de ensayos desarrollados en el motor óptico y maqueta CPF. Izquierda: Presión y temperatura de admisión en cada condición de operación. Derecha: Condiciones de temperatura y densidad del aire en la maqueta CPF.

Dicho lo anterior, la masa atrapada es estimada de manera ideal a partir de la ecuación de un gas perfecto y de las condiciones de presión y temperatura medidas en el remanso de entrada de aire al motor para ciclos en arrastre. Partiendo del análisis de la primera ley de termodinámica definido en CALMEC [30,31], y considerando efectos de transferencia de calor y estrés mecánico se considera que el blow-by es determinado a partir de una temperatura aparente de la lumbrera de salida del motor. A partir de ello, el blow-by es redistribuido angularmente de manera proporcional a la presión del cilindro. Bajo esta nueva condición, la masa atrapada es re-calculada nuevamente en conjunto con la relación de compresión y presión experimental, dando lugar a una estimación más realista de la temperatura del cilindro.

Se ha definido una matriz de ensayos (37 condiciones) que incluyen variación de la presión y temperatura en la admisión, con el objetivo de cubrir un

espectro de condiciones más amplio de las que se recogen en la *Tabla 3.6*. En este escenario y retomando la extensa información recabada en [5], la respuesta de la presión y la temperatura dentro de la cámara de combustible resultan linealmente dependientes a la presión y temperatura en la admisión del motor obteniendo los resultados referidos en la *Tabla 3.6* a partir de una regresión lineal de las condiciones 37 condiciones evaluadas. Dichos resultados son consistentes con las observaciones hechas en [5], los máximos de temperatura y presión máxima ocurren 4° y 0.84° APMS producto de la aplicación del mismo coeficiente politrópico en el ajuste de presión en cámara de todas las condiciones evaluadas.

Basado en el procedimiento arriba comentado, la *Figura 3.6* ejemplifica la estimación de densidad y temperatura alcanzada en las cinco condiciones definidas para el motor óptico en la *Tabla 3.6* en condiciones de arrastre. En referencia a la temperatura de aire, se han observado durante el evento de inyección caídas de presión en cámara correspondiente a una de 5 K en la temperatura máxima, que representa un 0.5 % de la temperatura objetivo. Mientras que en las estimaciones de densidad, la variabilidad coincide con las observadas en el caso de la temperatura (consistente con [5]).

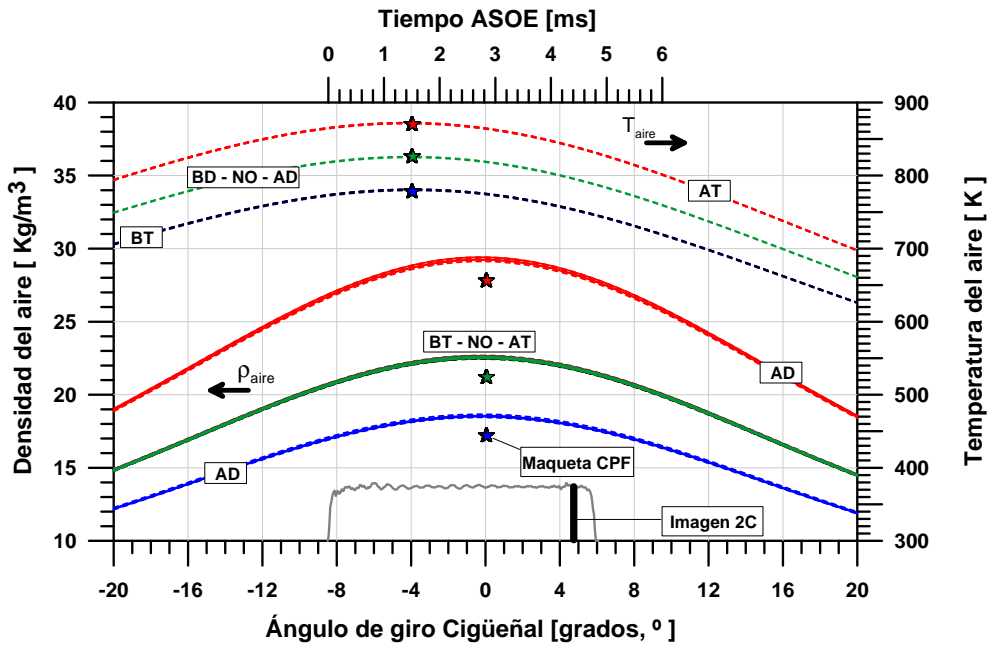


Figura 3.6.- Definición de condiciones de densidad y temperatura del aire en la operación del motor óptico (líneas) y la maqueta CPF (símbolos) determinada a partir de ciclos de arrastre. Referencia de

locación del pulso de la inyección (línea gris en la parte inferior de la figura). Instante de sincronización de imágenes de 2 colores (línea resaltada), según se mostrará en el capítulo 5.

A partir de las condiciones del motor óptico se han definido las correspondientes a la instalación CPF (véase *Tabla 3.6*) partiendo de una temperatura del aire igual a la máxima alcanzada en el motor Diesel, y una densidad objetivo como el promedio de la densidad en el motor óptico a lo largo del evento de inyección definido en la *Figura 3.6*.

3.4. Técnicas de visualización de chorros/llamas de inyección directa

Partiendo del interés de la investigación en ambas instalaciones, a continuación se detallan los procedimientos y condiciones específicas en la puesta a punto de las técnicas empleadas en el estudio. Ya que alguna de ellas ha sido empleada en ambas instalaciones, se hace referencia específica en su desarrollo e incluso en su aplicación en conjunto con cualquier otra técnica de manera simultánea. Si bien el orden aquí presentado no representa orden alguno en el desarrollo de los ensayos, sí que representa la mejor forma de transmitir al lector su aporte en este estudio, ya que alguna de ellas se plantean tanto para el estudio evaporativo no-reactivo como para el proceso de inyección-combustión.

3.4.1. Mie-scattering

Amplia es la fuente bibliográfica en referencia a como ocurre el proceso de dispersión (scattering en inglés) de luz en un chorro Diesel, que se basa en la teoría de Mie en cuanto a la dispersión elástica de luz en partículas esféricas. Bajo esta asunción, en un chorro Diesel se ha determinado que las partículas de combustibles resultan lo suficientemente grandes respecto a la longitud de onda incidente como para dispersar/reflectar la luz hacia la dirección de la proviene. No obstante, en el conjunto de la mezcla trascurren dos procesos que coexisten a lo largo del chorro, la dispersión de Mie y la dispersión de Rayleigh, una y otra dependen del tamaño de las partículas de combustible que como consecuencia del proceso de evaporación dan paso de un proceso completamente de dispersión de Mie a uno Rayleigh, cuando la totalidad de la mezcla se evapora. Dicho esto, la frontera entre ambos fenómenos es lo que determina la longitud máxima de combustible en estado líquido tal como se ha referido en la sección 2.3.3. El desarrollo de esta técnica es flexible en cuanto a la incidencia de la luz sobre el chorro, que bien puede desarrollar de manera difusa desde una fuente emisora, atravesando el chorro

y alcanzando un receptor en lo que se conoce como *iluminación trasera difusa*. O por el contrario puede desarrollarse con luz que incide desde una fuente que se encuentra ubicada en un lugar cercano al receptor, en lo que se conoce como *iluminación directa*, la cual se ha adoptado en este trabajo y se esquematiza en la **Figura 3.7**

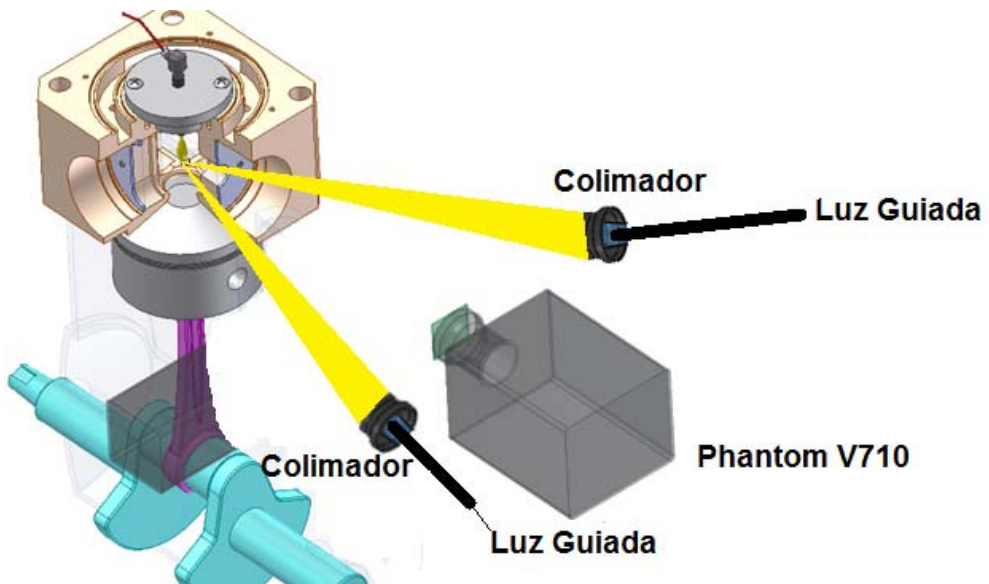


Figura 3.7.- Esquema óptico de medidas de longitud líquida en motor óptico.

Dado que el proceso de dispersión de luz es potencialmente proporcional a la magnitud de luz que incide sobre las partículas de combustible líquido, se han dispuesto dos fuentes emisoras de luz de arco de Xenon de 300 W de potencia, provistas de elementos de guía de luz de 8 mm de diámetro. Tal como se muestra en la **Figura 3.7** los elementos colimadores en el extremo de la guía de luz orientan la misma hacia la zona donde se ubica el chorro dentro de la cámara de combustión, además de proporcionar un mayor control del cono de luz incidente al chorro; lo cual ayuda a maximizar el potencial de dispersión al impactar sobre partículas líquidas. Característicamente la frontera entre el combustible líquido y vapor es difusa y oscilante a lo largo de un proceso de inyección, por lo que se requiere de un sistema receptor lo suficientemente potente para congelar o si cabe definir el chorro líquido de la manera más efectiva posible. En este caso se ha dispuesto una cámara de alta velocidad perpendicular al eje del chorro (cuidando los ángulos de giro e inclinación para evitar reflejos no deseados en las imágenes capturadas) con una resolución y tiempo de exposición del sensor de la cámara lo suficiente cortos como para facilitar una alta definición del chorro (véase **Tabla 3.7**).

Aún más, se ha cuidado de minimizar la distancia entre el receptor y el eje de chorro de manera de maximizar (i) el ángulo de colección de la luz dispersada por el combustible, y (ii) la relación mm/pixel para contar con una buena definición del chorro. La *Tabla 3.7* resume la puesta a punto del sistema óptico. El motor óptico, al contar con tres accesos ortogonales al inyector da cabida a su aplicación de manera simultánea con otras técnicas de estudio. Mientras que en la maqueta CPF, se ha implementado de manera singular, ya que no es posible implementarla de manera simultánea con las técnicas planteadas en esta tesis.

Procesado de imágenes:

En sintonía con muchos otros trabajos de investigación desarrollados dentro del CMT-Motores Térmicos, se ha empleado una metodología de procesado cuya parte fundamental es el algoritmo de umbralización, que permite separar en la imagen el chorro del fondo. Para ello se ha empleado la metodología descrita en [32,33], basada en un algoritmo de segmentación del tipo Loglikelihood Ratio Test (1D LRT), determina estadísticamente un nivel digital (ND) a partir del cual se separa aquello que se determina como chorro, de los que es fondo de la imagen.

Instalación	Elementos ópticos	Mie-scattering	Schlieren
Motor óptico*	Tipo de cámara	Phantom V710	Photron Ultima APX
	Tipo de lente	Karl Zeiss Macro $f=100\text{mm}$	SIGMA zoom 24-70mm
	Rango dinámico [bits]	12 (0-65000 ND)	10 bits (0-1024 ND)
	Velocidad de adquisición [fps]	22189	12500
	Tiempo de exposición [μs]	3	20
	Resolución de imagen [pixel]	336 x 600	256 x 512
	mm/pixel [-]	0.0549	0.1612
	Maqueta CPF	Tipo de cámara	Phantom V710
Tipo de lente		SIGMA zoom 24-70mm	SIGMA zoom 24-70mm
Rango dinámico [bits]		12 (0-65000 ND)	12 (0-65000 ND)
Tiempo de exposición [μs]		5	0.3
Velocidad de adquisición [fps]		47019	47019
Resolución de imagen [pixel]		384 x 200	544 x 184
mm/pixel [-]		0.0829	0.297

Tabla 3.7.- Cámaras y material óptico. Puesta a punto específica de cada técnica e instalación. (*)
Ambas técnicas se han desarrollado de manera simultánea

Posteriormente, la imagen binaria resultante es sometida a algoritmos de conectividad para establecer el contorno del chorro, lo cual facilita llevar a cabo medidas geométricas del chorro. En este punto resulta evidente que el potencial lumínico del sistema óptico en uso no solo permite una mejora en cuanto a la definición del chorro de combustible líquido tal como se observa en la *Figura 3.8*, sino que mejora la definición del umbral de separación y en definitiva de las medidas llevadas a cabo durante el procesado de imágenes.

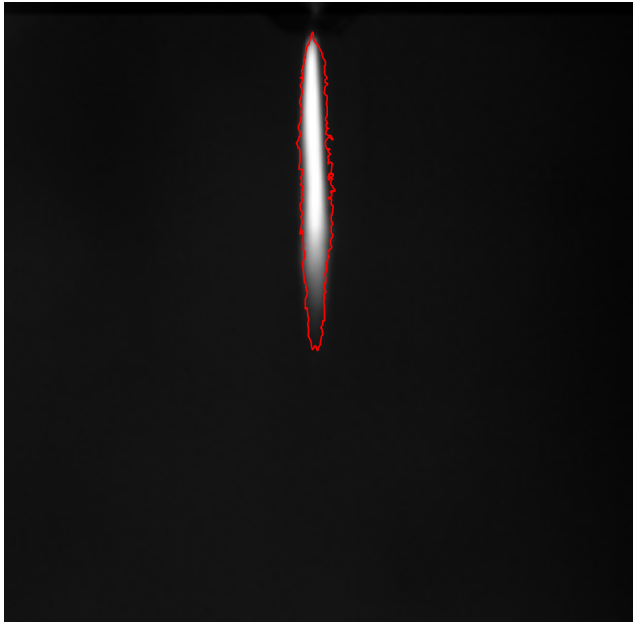


Figura 3.8.- Contorno detectado por el algoritmo de procesado LRT. Imagen de longitud líquida captada en el motor óptico. Condición **AD**, $P_{iny}=100$ MPa instante 2.52 ms después de la energización del inyector (ASOI, acrónimo en inglés). La imagen corresponde a la región de interés en el procesado.

Para el total de 15 ciclos de inyección se ha determinado la longitud líquida máxima en cada instante de todo el evento de inyección, definida como la distancia entre el orificio de inyección y la posición más lejana del contorno detectado a dicho orificio. La *Figura 3.9* muestra un ejemplo de resultados en el motor óptico. A partir de los resultados de cada imagen (símbolos) se determina el promedio en cada instante del proceso de inyección, resultando en la evolución (línea sólida) de la figura y a partir de los cuales se desarrolla el análisis en de próximas secciones.

Es importante resaltar que las dispersiones observadas tanto en la figura como en las diferentes condiciones evaluadas, son representativas de las observadas en estudios relacionados con la definición de la máxima longitud de combustible líquido en la misma instalación [23,34,35], aunque es importante resaltar la dispersión asociada al tipo de combustible donde el carácter mono-componente del n-Heptano se ve reflejado en una dispersión alrededor de 1 mm en todo el evento de inyección, mientras que la presencia de diferentes componentes en el Diesel arroja dispersiones de alrededor de 4 mm en la misma medida, bajo las mismas condiciones tanto termodinámicas como del material óptico empleado (iluminación, cámara, etc.).

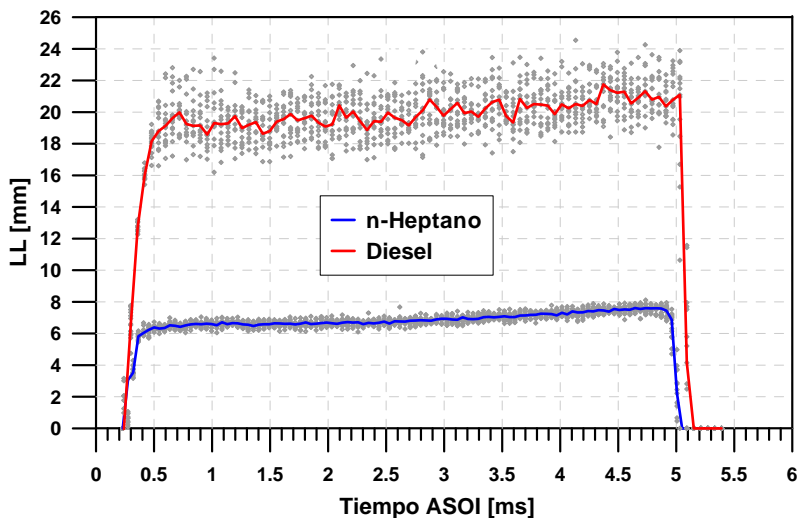


Figura 3.9.- Evolución temporal de longitud líquida de Diesel y n-Heptano en el motor óptico bajo las condiciones AD (ver *Tabla 3.6*). $P_{iny}= 100$ MPa; Tobera B.

3.4.2. Visualización schlieren

Históricamente, la ombroscopía/shadowgraph es una técnica de medida que se ha usado para medidas científicas que datan desde el siglo XVIII, tal como refiere Settles [36]. Si bien su uso científico está relacionado con condiciones específicas en cuanto al material óptico empleado, el efecto shadowgraph es algo presente en la vida cotidiana debido a la constante interacción entre fluidos. El carácter incontrolado en la interacción de la luz y gases como el aire nos permite a simple vista observar un horizonte difuso en un día de verano o pensar que las estrellas en el cielo parpadean. Este concepto erróneo tiene su respuesta en la desviación que sufre la luz en su viaje desde un emisor hasta un receptor como

consecuencia de la variación del índice de refracción (n) de los elementos que interaccionan, dada la no uniformidad a lo largo del medio por el cual viaja la luz, por lo que el receptor interpreta sombras o variación de intensidad de luz proveniente desde el emisor.

La relación existente entre el índice de refracción y la densidad del medio es lo que en términos de estudios de mezcla de chorro de inyección directa ha sido determinante en su aplicación. Ya que tal como se describe matemáticamente en [36] según la *ecuación 3.8*, existe una proporcionalidad del índice de refracción (n) expresada a través del número de Gladstone-dale (k) y la densidad del fluido (ρ).

$$n = k \cdot \rho + 1 \quad (3.8)$$

En estudios de inyección/combustión, la técnica de shadowgraph está sustentada en un arreglo coherente de rayos de luz que atraviesan el medio en estudio que requiere de un detallado control y conocimiento de la propagación de la luz a través de cámaras de combustión de instalaciones como las de la sección 3.3. El escenario más simple para poner en marcha la técnica es creando un arreglo de haces paralelos de luz proveniente de una fuente puntual a través de una lente como se ejemplifica en la *Figura 3.10a*. Sobre el plano A-A se pueden observar distintas intensidades de luz debido a la desviación que sufre un haz de luz respecto a su dirección original de propagación, y que es consecuencia de los efectos considerados en el esquema que incluyen: gradientes de densidad del gas dentro de la cámara de combustión y los propios a lo largo del chorro inyectado.

Comenzando por un rayo teóricamente no perturbado y que no interacciona con el chorro (como el etiquetado con “1” en la *Figura 3.10b*), una vez que transita por un medio no uniforme, sufre una desviación como consecuencia de su interacción con gases a una densidad/temperatura elevada, tal como se ejemplifica con el punto rojo del plano A-A en la *Figura 3.10a*, que sufre una desviación respecto de su dirección original (punto amarillo del plano A-A). La interacción de la luz con el chorro inyectado, y como consecuencia de una composición variable de aire-combustible, induce a que el índice de refracción y por lo tanto la magnitud de desviación de la luz varíe. Los mayores gradientes se encuentran dentro de fase líquida de combustible y cerca de la tobera (etiqueta “2” en la *Figura 3.10b*), mientras que los menores gradientes se encuentran lejos de la punta de la tobera (etiqueta “3” en la *Figura 3.10b*). Inclusive, es posible encontrar tasas de mezcla

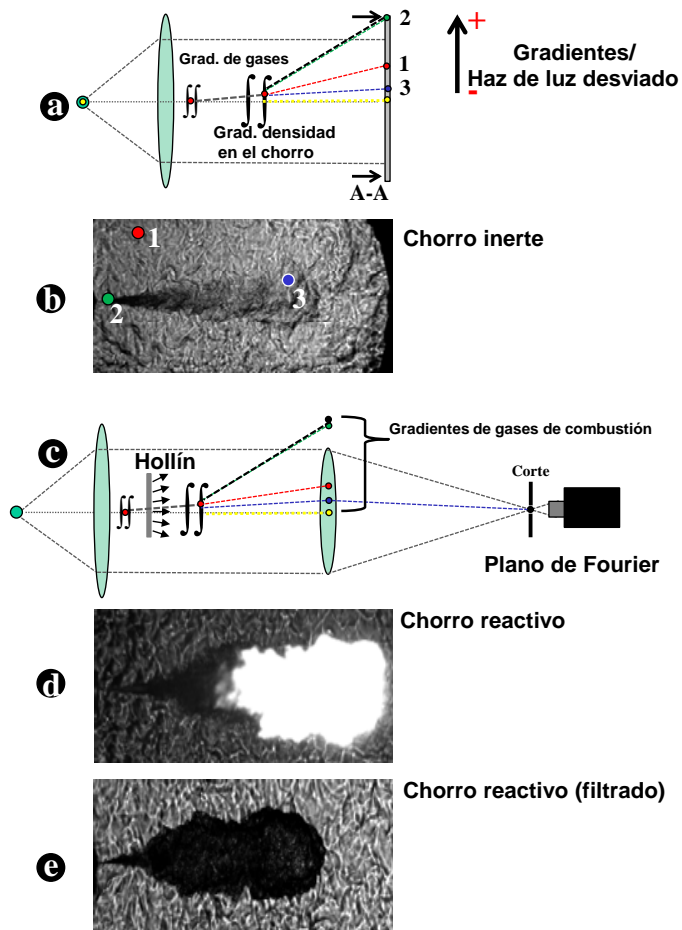


Figura 3.10.- Descripción del efecto de shadowgraph/schlieren aplicado en estudios de chorros Diesel tanto inertes como reactivos.

aire-combustible que pueden coincidir con magnitudes de desviación inducidas por gases (etiqueta “1” en la *Figura 3.10b*).

El carácter controlado de la técnica de shadowgraph se extiende en la zona de colección en la que se usa una segunda lente, que re-orienta los rayos de luz indistintamente de su grado de desviación a al sensor de la cámara tal como se en la *Figura 3.10c*. El corte o bloqueo de luz es definido en el *plano de Fourier*, donde la luz colectada se re-enfoca nuevamente y la imagen shadowgraph toma la connotación de imagen schlieren por el corte aplicado en el plano, tal como define Settles [36]. En esta configuración, es incluso factible que rayos que atraviesen

mezclas con índices de refracción muy bajos puedan seguir el camino óptico recorrido por haces de luz no perturbados; tanto en cuanto sean reorientados por la segunda lente y sobrepasen la restricción en la plano de Fourier, tal como se ha esquematizado con el punto amarillo de la *Figura 3.10c*.

3.4.2.1. Adaptación a chorros reactivos

Fenomenológicamente, como consecuencia de la liberación de calor durante la combustión, el incremento de temperatura debido al frente de llama crea un gradiente de densidad directamente relacionado con una magnitud de desviación de luz originado por los gases de combustión de la *Figura 3.10e*. Resulta difícil en este punto definir la magnitud de la desviación, sin embargo hipotéticamente resulta al menos similar a la producida por el combustible líquido, debido a que los ND de la *Figura 3.10e* se asemejan a los etiquetados como “2” en la *Figura 3.10b*.

La presencia de partículas de hollín resulta en una emisión de luz tal como se ejemplifica en la *Figura 3.10d*. Si bien tal emisión no perturba a las bases del efecto schlieren, introduce la problemática de contaminación de pixeles inducidos por saturación de pixeles aledaños conocido como *blooming* [38]. Tal observación impacta directamente en las medidas resultantes del tratado digital de las imágenes y por lo general resultan en sobre-estimación de medidas como la penetración de vapor. Además, la necesidad de confinar la información en un sensor (generalmente de tamaño reducido) por medio de lentes de tamaño reducido resulta en incertidumbres adicionales.

Tal como se muestra en la *Figura 3.10c*, la distancia entre el punto de desviación de un haz de luz y el tamaño de la lente acoplada a la cámara limita la capacidad de tener un sistema con un efecto schlieren controlado por la incapacidad de coleccionar luz que resulte muy desviada de su camino óptico original. En ese sentido, siguiendo las recomendaciones de Pastor et al. [39] para la obtención de medidas de penetración fiables se ha definido un sistema en el que: (i) se añade un corte en el plano de Fourier (ii) se ha minimizado la distancia entre el chorro y la lente de colección y (iii) se ha maximizado el diámetro de la lente acoplada a la cámara.

Como consideración final, se han establecido un filtrado cromático y temporal de la llama tal como se muestra en la *Figura 3.11*. El objetivo es el de eliminar por completo la saturación de pixeles por luminosidad del hollín que bajo las diversas condiciones de operación adoptadas en el estudio resulta variable. Partiendo de condiciones de operación menos favorable y sistema óptico sin modificaciones, se ha disminuido el tiempo de exposición respecto a lo estudiado

en [39] (desde $10 \mu\text{s}$ hasta $0.3 \mu\text{s}$). Lo cual tal como se muestra en la figura, resulta en una llama más opaca (secuencia central de la figura). Además, se ha instalado un filtro BG-39 delante del sistema de corte. Las especificaciones en [40] muestran que este filtro tiene un pico de transmisividad de 88% a la longitud de onda de 513 nm, con un transmisividad menor del 10% en longitudes por debajo a 330 nm o superiores a 660 nm. Todo ello contribuye a eliminar la luminosidad de la llama de la imagen schlieren. En resumen, las consideraciones adoptadas definen imágenes “zero-blooming” características e indicativas del proceso de combustión sin información relativa a la emisión de luz por partículas de hollín o cualquier otro radical presente en la llama, tal como muestran las imágenes de la secuencia inferior de la *Figura 3.11*.

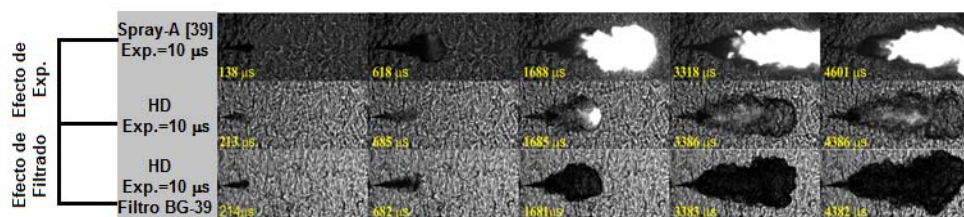
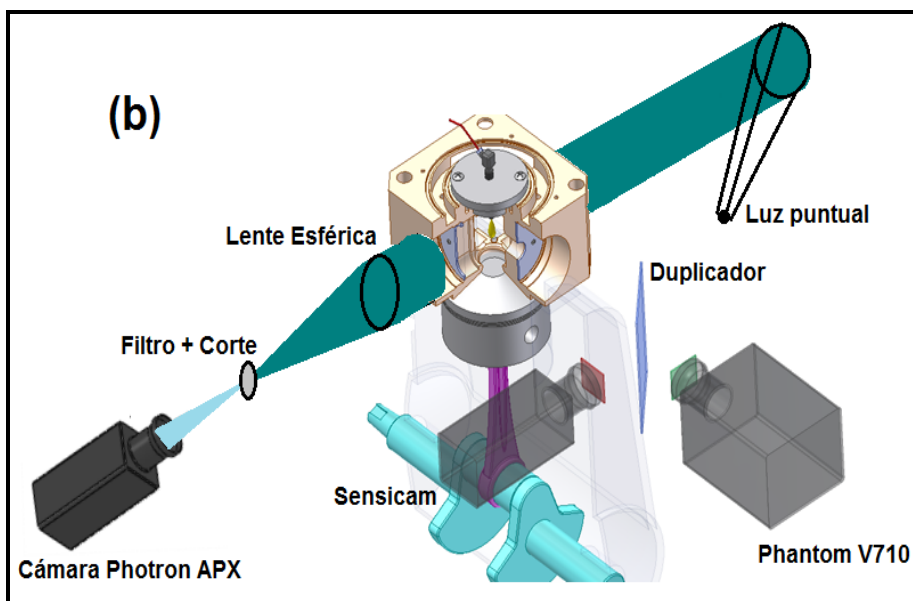
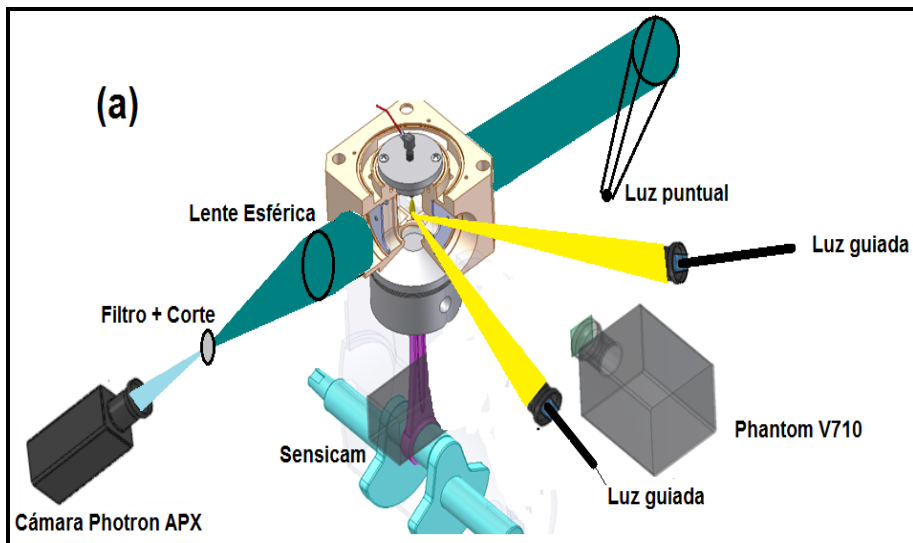


Figura 3.11.- Efectos de los filtrados cromáticos y temporal en la evolución de la penetración de llama en imágenes schlieren en maqueta CPF. Apertura de 4mm de diámetro en el plano Fourier (véase *Figura 3.10c*). Condiciones de ambiente de Spray-A y AD descritas en las *Tabla 3.2* y *Tabla 3.6*, respectivamente. Tobera A (Spray-A) y Tobera C (Condición AD); $\Delta P_{\text{iny}} = 50 \text{ MPa}$.

3.4.2.2. Arreglos ópticos

El arreglo óptico schlieren la *Figura 3.12*, a excepción de las cámaras de adquisición, se han mantenido indistintamente de la instalación usada (véase *Tabla 3.7*). Dicho montaje ha sido simultaneado con el de Mie-scattering para chorros no-reactivos sólo en el motor óptico (véase *Figura 3.12a*). En el estudio de chorros reactivos realizado en dicha instalación, se ha empleado de manera simultánea, tal como se muestra en la *Figura 3.12b* con la termometría de dos colores (abordada en el capítulo 5). Mientras que en la maqueta CPF (véase *Figura 3.12c*), por su propia configuración, limita su aplicabilidad de manera simultánea. En consecuencia, en estudios no-reactivos la visualización de schlieren se ha realizado en campañas de ensayos distintas a las de Mie-scattering. Mientras que en estudios reactivos, sin interferencia de ningún tipo, es acompañada de una cámara de visualización de baja velocidad sin intervenir en el arreglo schlieren (véase la utilidad de la segunda cámara ICCD de la *Figura 3.12c* en la sección 3.5.3).



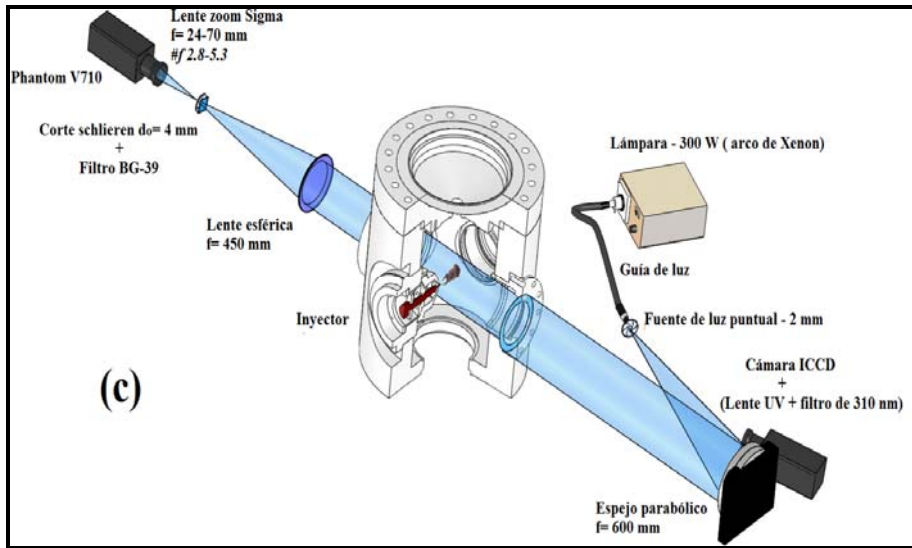


Figura 3.12.- Arreglos ópticos usados en investigación de chorros inertes y reactivos. **a:** Estudios no-reactivos de longitud líquida y schlieren en el motor óptico. **b:** Estudios reactivos de método de dos colores y schlieren en el motor óptico. **c:** Estudios reactivos de schlieren y quimioluminiscencia del OH* en la maqueta CPF.

El sistema schlieren “paso simple” [36], puede dividirse en dos secciones diferentes definidas como secciones de iluminación y colección (véase **Figura 3.12c**) En la parte de iluminación aguas arriba del chorro, se crea un arreglo de rayos paralelos colocando una fuente de luz puntual difusa a la distancia focal de un espejo parabólico ($f=610$ mm). La fuente puntual, creada a partir de un diafragma óptico de 2 mm de apertura, se ha obtenido a partir de una guía de luz acoplada a una de las fuentes de luz de la sección 3.5.1. En tal condición el área de iluminación (150 mm) garantiza la visualización de la máxima penetración a visualizar en cualquiera de las instalaciones (78 mm en el motor óptico, 105 mm en la maqueta CPF). En la parte de colección, una lente esférica ($f=450$ mm) se encarga de coleccionar la luz (desviada o no) enfocándola en el plano de Fourier donde se dispone un corte circular de 4 mm y que previamente se ha filtrado cromáticamente con el filtro BG-39. Finalmente, la luz remanente es guiada al sensor por medio de lentes acopladas a las cámaras cuyas características se resumen en la **Tabla 3.7** según la instalación empleada.

En relación a las consideraciones hechas por Settles [36], la configuración óptica adoptada puede acarrear aberraciones ópticas como el astigmatismo debido a las diferencias en el camino óptico a lo largo del espejo parabólico y que es producido por la incidencia lateral de la luz que proviene de la fuente de luz

puntual. En este caso, atendiendo a los comentarios de Settles, el ángulo de incidencia se ha reducido al mínimo para evitar este tipo de aberraciones. Es de admitir que debido a las dimensiones de las instalaciones, el ángulo sólido de colección no ha podido mantenerse constante debido a que la distancia mínima de ubicación de la lente de colección es mayor en la maqueta CPF (menor ángulo sólido frente al motor óptico), fomentándose el corte no deseado de luz como lo representado en la *Figura 3.10e* (líneas verdes y negras no colectadas por la lente) intrínseco a las dimensiones de la instalación. *No obstante en los resultados presentados posteriormente se puede adelantar el no haber observado ninguna diferencia atribuible a tal condición del ángulo sólido*, así como tampoco se ha referenciado en diferentes estudios realizados previa y posteriormente con este tipo de configuración e instalación [27,39,41].

3.4.2.3. Procesado de imágenes

Coincidente con las diferencias entre instalaciones ópticas, las herramientas de procesado digital de imágenes schlieren están relacionadas con estas. En primera instancia, la herramienta basada en el algoritmo LRT de la sección 3.5.1 se ha usado en el procesado de imágenes provenientes de ensayos realizados en el motor óptico, de lo cual se puede añadir que el análisis del umbral para la definición del chorro/llama es diametral opuesto al de la imagen de longitud líquida, dado que los ND de fondo (blanco) y de llama (gris) de la imagen de schlieren así lo requieren.

En segunda instancia, se ha usado un código libre para medida de penetración desarrollado en *Sandia National Laboratories* [1] y propuesto como herramienta standard por la comunidad de ECN en las medidas relativas a ensayos realizados en la CPF. Evitando tomar crédito del planteamiento de los desarrolladores, el método intenta remover el efecto schlieren producido por los gases calientes que rodean la estructura del chorro [42] y está basado en la “Textura” que una imagen tiene en cualquier instante. Para ello, a partir de un proceso derivativo a la imagen I_t se le restan las dos imágenes precedentes $I_{m,t-1}$ y $I_{m,t-2}$. Como resultado se resaltan las zonas activas de la imagen $I_{m,t}$, es decir, aquellos pixeles que experimentan variaciones en el índice de refracción producto de (i) movimiento del chorro (objetivo del análisis) o (ii) movimiento de los gases de fondo. La imagen resultante de este proceso es tratada con algoritmos de conectividad y la medida de penetración es determinada en base a los procedimientos definidos en [43]. Es bajo esta premisa que el análisis de textura resulta inútil aplicarse en imágenes provenientes del motor óptico, dado que la velocidad de los gases del orden de 30 m/s provee una imagen final que carece de textura frente a imágenes de la maqueta CPF donde las velocidades no superan los

0.3 m/s. Mientras que el proceso está probado como útil inclusive en instalaciones de similares características del flujo de aire a las de la maqueta CPF [44,46] no así una vez más, en el motor óptico.

3.4.3. Quimioluminiscencia de OH*

Tal como se advierte en la sección 2.4 del capítulo 2, desde el inicio del proceso de combustión de alta temperatura y hasta el final del mismo, el proceso de oxidación de radicales emite radiación en forma de quimioluminiscencia. Algunos autores [48,49] indican que la radiación que emite el radical excitado OH* localizada en la longitud de onda de 306 nm, es característica y definitoria de la región de la llama donde ocurre la reacción química. En este sentido, la distancia definida entre la punta de la tobera y el inicio de la zona de quimioluminiscencia es definida como la longitud de despegue, o lift-off en inglés.

Experimentalmente, la medida resulta de visualización directa y ortogonal de la quimioluminiscencia de la llama, y se ha realizado exclusivamente en los ensayos parte de estudio paramétrico del spray-A de la *Tabla 3.2* para lo que se ha ubicado una cámara en un lateral de la sección de colección del arreglo schlieren de la *Figura 3.12c*. La cámara Andor del tipo ICCD, está equipada con una lente UV $f/4$ de distancia focal de 100 mm y acoplada con un filtro de paso 310nm ± 5 nm, observando la llama dentro de la maqueta CPF con una definición de 0.16 mm/pixel. La cámara registra una imagen por ciclo de inyección, integrando la emisión ocurrida entre 2 ms y 3 ms ASOE con una intensificación del aproximadamente del 90%, maximizando la señal registrada para las condiciones de la *Tabla 3.2* y evitando saturación del sensor de la cámara.

El procedimiento de procesado es igual al empleado en [49], el cual se ha adoptado por la comunidad ECN para el análisis de imágenes quimioluminiscencia del OH* bajo las condiciones de spray-A (ver *Tabla 3.2*). Tal como se muestra en la *Figura 3.13*, la quimioluminiscencia se aprecia a partir de una cierta distancia de la tobera coincidente con aumento repentino del nivel de intensidad en las mitades superior e inferior de la imagen que tiende a estabilizarse al alejarse de la punta de la tobera. A partir de la metodología descrita en [50,51], el lift-off \overline{LOL}_{OH} se define como el promedio en ambas mitades de la imagen de la distancia a la cual la intensidad acumulada de OH* supera el 50% del máximo de intensidad registrada.

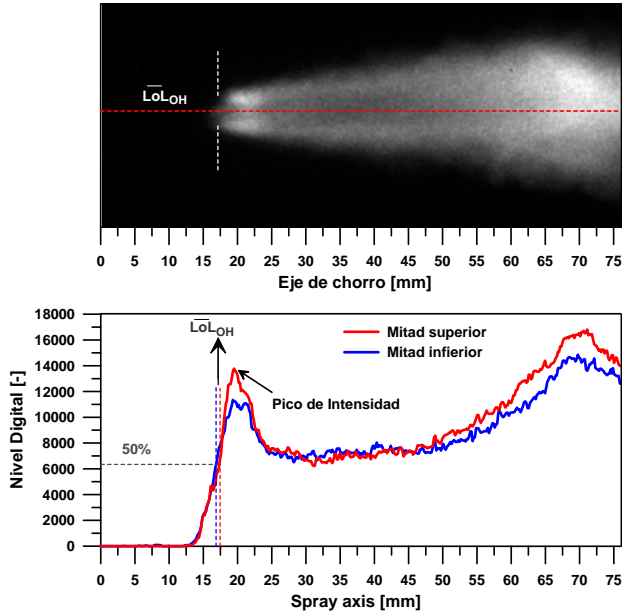


Figura 3.13.- Arriba: Quimioluminiscencia del OH* a lo largo del eje del chorro en las condiciones de spray-A. Bajo: Análisis de lift-off resultante del método de la rodilla (“knee” en inglés). $T_{\text{aire}}=900$ K, $\rho_{\text{aire}}=22.8$ kg/m³, $P_{\text{iny}}=150$ MPa y Tobera A.

3.4.4. Radiación de amplio espectro

En la variación paramétrica de spray-A de la *Tabla 3.2* se ha empleado la visualización de radiación de amplio espectro con la intención de determinar el retraso al auto-encendido en instalaciones de presión constante, en la que resulta difícil el análisis a través del procesado de la señal de presión. Sin embargo, el carácter óptico de la técnica por otra parte, ha permitido de extraer información adicional relacionada con medidas análogas al lift-off de quimioluminiscencia de OH*, que serán contrastadas con las medidas de lift-off, discutidas en el capítulo 4.

Este proceso parte de la medición de la luminosidad captada por una cámara de alta velocidad (las características del sistema óptico se pueden encontrar en [52]) en conjunto con un filtro de paso de onda bajo 600 nm. Aumentando el contraste de manera digital, el objetivo es visualizar la aparición de zonas de quimioluminiscencia de amplio espectro, indicadores del autoencendido, tal como ejemplifica Lillo en su trabajo [52]. La información de la *Figura 3.14* resume el proceso de determinación del retraso al autoencendido en la parte izquierda, y que está asociado a una escala espacial del chorro como la de la parte derecha de la

figura. El análisis de la intensidad dentro de la zona de quimioluminiscencia determina el nivel máximo de intensidad como el promedio espacial de los 6 píxeles más cercanos al de máximo nivel digital ND en cada instante. A partir de la evolución temporal, el auto-encendido se define como el instante donde se supera un umbral de 50% de la máxima intensidad de toda la evolución temporal, que tal como se ha determinado en [52] es suficiente robusto para aislar la zona de quimioluminiscencia de baja temperatura. *A partir de la imagen registrada en el instante del autoencendido, se define la longitud de lift-off como la ubicación a lo largo del eje del chorro donde se encuentra el píxel de máxima intensidad. Esta será la magnitud objetivo de estudio en el capítulo 4.*

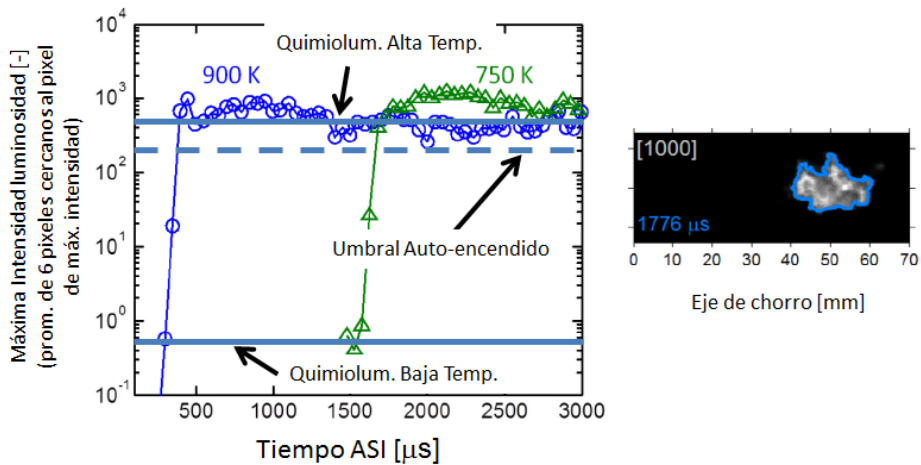


Figura 3.14.- Izquierda: Evolución temporal de máxima intensidad luminosa en condiciones definidas por Lillo en [52] con temperaturas del aire de 750 K y 900 K. Derecha: Luminosidad captada en el instante 1776 μs después de la energización del inyector [ASI, acrónimo en inglés]; valor encerrado en corchetes define el ajuste de contraste de la imagen a lo largo del eje del chorro.

3.5. Modelado 1-D de mezclas de chorros de inyección directa

El conocimiento del comportamiento del chorro en condiciones de motor Diesel ha permitido el desarrollo de leyes de escalado empíricas para la penetración del chorro o la longitud líquida máxima. Sin embargo, la naturaleza transitoria en un ambiente con condiciones variables en un motor (composición, temperatura y densidad del aire) y combustible inyectado también en condiciones variables (tasa de combustible inyectado, flujo de cantidad de movimiento) limita la aplicación de leyes de escalado a chorros cuasi-estacionarios y muestra la necesidad de modelos

más complejos. Si bien los modelos CFD son cada vez más aplicados en la descripción de chorros, existen limitaciones importantes referidas a la máxima resolución del mallado a la hora de reproducir procesos de atomización e intercambio de momento cerca de la tobera. En ese sentido modelos más simples como el modelo 1-D de Pastor et al. [21] muestran una relativa precisión en la predicción del comportamiento de chorros tanto transitorios como cuasi-estacionarios. Dicho modelo se empleará en el Capítulo 4 como apoyo cuantitativo a la discusión.

Si bien la descripción general del modelo se puede encontrar en [53,54], es conveniente presentar una breve descripción del mismo, su aproximación y procedimiento de cálculo, para finalmente puntualizar sobre los parámetros escogidos para el posterior análisis. En el modelo 1-D, se asume que el chorro posee un perfil radial de velocidades similar en la zona de turbulencia desarrollada. De esta manera, el intercambio de momento del combustible con el aire circundante conlleva un ensanchamiento radial del chorro determinado por el ángulo de chorro (Θ) y un aumento de la distancia axial. Característico del modelado transitorio, el chorro es dividido axialmente en un número finito de celdas que engloban radialmente al mismo. En el eje o línea central del chorro los valores instantáneos de la velocidad en dirección axial, fracción de mezcla (f , definida en [21]) y fracciones máxicas de las especies mezcladas o formadas (en el caso de chorros reactivos) entre otros, son el resultado de la solución las ecuaciones de conservación de momento axial y de combustible. Como parte de los datos de entrada al modelado 1-D se encuentran: (i) Condiciones termodinámicas en el ambiente motor (presión, temperatura y densidad del aire), (ii) tasa de inyección en la tobera, (iii) tasa de cantidad de movimiento en la tobera y (iv) ángulo de chorro (Θ).

A lo largo de la descripción de los materiales y metodologías empleadas en este trabajo queda resuelta la cuantificación de los tres primeros parámetros del modelo. En lo que se refiere a la cuantificación del ángulo de chorro (Θ), es un parámetro sujeto a controversia en la literatura. Si bien schlieren no es un método adecuado para su determinación, tal como se ha discutido en [55]. La variación del montaje óptico de schlieren (principalmente el corte en el plano de Fourier) repercuten en la sensibilidad de la técnica y por ende en la cuantificación de este parámetro. Aún más, indicaciones encontradas en [56] atribuyen una variabilidad del ángulo de chorro en la evolución del chorro transitorio. Tales incertidumbres, en conjunto con la variabilidad del ángulo de chorro inerte descrito en la *Figura 2.6* son elementos de peso para la definición del ángulo de chorro como un parámetro de ajuste, obtenido a partir de la optimización de la penetración y de los parámetros de mezcla derivados del modelo 1-D.

3.6. Evaluación del chorro inerte en los entornos experimentales usados

Como evaluación final de la metodología, se presenta en esta sección una comparación de las medidas realizadas en los dos entornos experimentales presentados en este capítulo, esto es, el motor óptico y la maqueta de presión constante. Teniendo en cuenta que el objetivo final de esta tesis es el estudio del chorro reactivo, esta evaluación permitirá establecer las características del chorro inerte en cada una de las instalaciones sobre el cual posteriormente tendrán lugar los procesos de liberación de calor.

Mie-scattering y máxima longitud líquida

La *Figura 3.15* resume el resultado de máxima longitud líquida estabilizada para las condiciones termodinámicas de la *Figura 3.6* y valor medio de $P_{iny}=100$ MPa. El valor cuasi-estacionario se ha determinado en cada condición como el valor promedio a lo largo del intervalo 2-3 ms ASOI (véase *Figura 3.9*). De esta manera se evita la parte del ciclo del motor donde empieza a ser notable la bajada en densidad y temperatura ambiente debido al movimiento de expansión del pistón, aspecto que no ocurre en la CPF. Una prueba de ello se puede apreciar en la *Figura 3.9* el nivel ascendente de la máxima longitud líquida entre 2.5 ms y el final de inyección.

En cuanto a los combustibles inyectados, es notable que las mayores diferencias observadas más allá del valor máximo de longitud líquida estén en la variabilidad en la medida (véase en la *Figura 3.9*). La explicación a tal observación tal como reseña Siebers en [57], resulta de una fórmula química más simple y carente de aromáticos que define una temperatura de vaporización con poca variabilidad del n-Heptano frente al Diesel.

De manera análoga a lo comentado en la sección 2.3.3, se ha desarrollado una ley de escalado de la longitud líquida estabilizada frente a los parámetros de mezcla considerados en este estudio, tal como se puede encontrar en [5,10,27]. Partiendo de n-Heptano como combustible inyectado por el interés asociado al modelado CFD (propiedades fisico-químicas conocidas), la ecuación 3.8, relaciona la máxima longitud líquida frente a la presión de inyección (P_{iny}), temperatura del aire (T_{aire}), densidad del aire (ρ_{aire}), diámetro de tobera (d_o) y la constante del modelo (K).

$$LL[mm] = K \cdot d_o^a [\mu m] \cdot T_{aire}^b [K] \cdot \rho_{aire}^c [kg / m^3] \cdot P_{iny}^d [MPa] \quad (3.8)$$

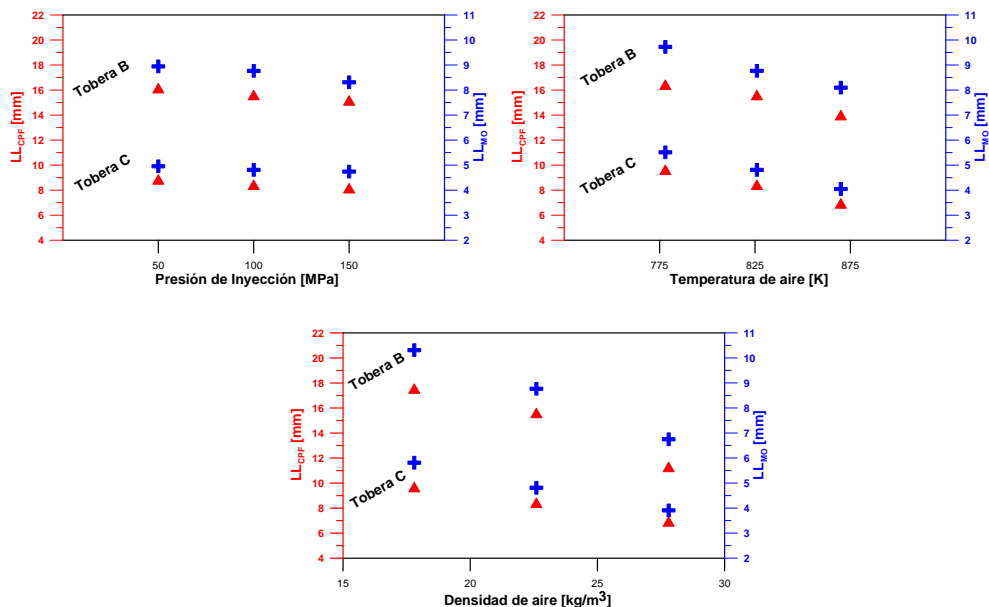


Figura 3.15.- Escalado de máxima longitud líquida en el motor óptico y maqueta CPF. Influencia de la presión de inyección, temperatura del aire, densidad del aire y diámetro de tobera a partir de las condiciones nominales **NO** del estudio ($T_{aire} = 826K$, $\rho_{aire} = 21.2 kg/m^3$), $P_{iny} = 100$ MPa y n-Heptano como combustible inyectado.

La **Tabla 3.8** resume los coeficientes obtenidos a partir de la regresión realizada sobre los datos experimentales. El efecto de parámetros considerados responden en consecuencia a lo encontrado en la literatura [21,58]. En cuanto a la presión de inyección, se observa una pequeña disminución de la máxima longitud líquida en ambas instalaciones, con un exponente un tanto mayor para el motor óptico en la **Tabla 3.8**. No obstante, con las tendencias observadas en ambas instalaciones (relativa poca influencia de la presión de inyección en la máxima longitud) se puede decir que dicho exponente está afectado por variabilidad experimental atribuible a cada instalación, y es casi despreciable. Ello confirma la hipótesis de control de la evaporación por mezcla.

En ambas instalaciones la repuesta de los modelos empíricos concuerda con el entendimiento de un proceso de evaporación controlado por mezcla, tal como advierte Siebers [58], García [53], entre otros [59]. En ellos se hace referencia a una disminución de la máxima longitud líquida como consecuencia de una mayor temperatura/densidad del aire en el periodo de la inyección. Ello es debido a que el aumento de estos parámetros aumenta la tasa de mezcla (densidad) y de entalpía aportada por el aire, favoreciendo una evaporación más rápida. En consecuencia,

las dependencias con la longitud líquida son inversas, como que se advierte en el escalado de la **Tabla 3.8**. Por otra parte, el aumento diámetro de tobera ralentiza el proceso de mezcla, y la longitud máxima se escala de acuerdo a los exponentes de la **Tabla 3.8**.

Parámetro	Cte	d_o	T_{aire}	ρ_{aire}	P_{iny}	$\%R^2$	ECM
Exponentes	-	a	b	c	e	-	-
Exponentes extraídos de [21]	-	1	-1.58	-0.5	0	-	-
Motor óptico	2.17E+04	1.2652	-1.7985	-0.759	0.0549	99.33	0.1202
Maqueta CPF	2.70E+06	1.552	-2.2139	-0.8152	-0.0945	98.56	0.3709

Tabla 3.8.- Modelo empírico de la máxima longitud líquida en función de los parámetros variados en el estudio. Incluyendo modelos tanto para el motor óptico como la maqueta CPF.

Es interesante señalar que los valores de los exponentes son relativamente similares a los que se obtienen en la literatura. No obstante, en cuanto al valor absoluto de la máxima longitud líquida, tal como se ha plasmado gráficamente en la **Figura 3.15** (donde existe proporcionalidad entre los ejes de medida de ambas instalaciones) existe una relación entre la longitud líquida máxima en ambas instalaciones, tal que la $LL_{CPF} \approx 1.7 LL_{MO}$. Indistintamente de la condición evaluada, la relación entre las longitudes máximas resulta del orden de magnitud previamente comentado, por lo que presumiblemente las diferencias observadas entre instalaciones pueden estar relacionadas con características propias de cada instalación. En este sentido, la diferencia entre condiciones de operación en ambas instalaciones (densidad y temperatura del aire) podrían ser una fuente de discrepancia entre instalaciones, de acuerdo con lo observado en la **Figura 3.6**. En el caso de la temperatura del aire y en el intervalo considerado como longitud líquida máxima (2-3 ms), las diferencias de temperatura (7 K en el mismo intervalo) resultan poco significativas para salvar las diferencias en la longitud líquida máxima entre instalaciones. Mientras que en el caso de la densidad del aire, considerando las tendencias encontradas por García en [21] con $\rho_{aire}^{-0.5}$, las diferencias entre la densidad en el motor óptico y la maqueta CPF define una longitud líquida sólo un 4% mayor en la maqueta CPF, siendo muy distante del 70% ($LL_{CPF} \approx 1.7 LL_{MO}$) resultante de la **Figura 3.15**.

Además de las diferencias ya comentadas en el párrafo anterior, las diferencias solo pueden relacionarse a la diferencia de temperatura de combustibles en el saco o punta de la tobera de inyección. Tal como se ha comentado en la sección 3.3, en la maqueta CPF por sus características constructivas continuamente la punta de la tobera está sometida a altas temperaturas y es por lo que un sistema de enfriamiento se ha dispuesto para mantener el conjunto del inyector funcional. En estudios previos realizados por Payri et al. [60] en la misma instalación y con

temperaturas de enfriamiento del cuerpo del inyector similares a la usadas en este estudio (90°C), se ha determinado que la temperatura cerca de la punta de la tobera alcanza los 120°C y reporta una diferencia de hasta 15% en la longitud líquida máxima si se varía la temperatura del cuerpo del inyector. En el caso del motor óptico sin embargo, por sus características constructivas no dispone de un sistema de enfriamiento del cuerpo del inyector. Haciendo una analogía simplista con lo reportado por Payri et al. [60], la temperatura incontrolada del cuerpo del inyector maximiza la temperatura de la punta de la tobera respecto a la maqueta CPF. Es decir, que la longitud líquida máxima sería consistente más corta que en el caso de la maqueta CPF tal como se aprecia en la *Figura 3.15*.

Visualización schlieren y penetración del chorro

La *Figura 3.16* muestra la estadística de la evolución temporal de la penetración en ambas instalaciones experimentales. En el caso de la maqueta CPF, cinco son los ciclos de inyección registrados y el área azul en la figura representa la dispersión $\pm\sigma$ respecto de la media de los ciclos. Mientras que en el caso del motor óptico, 15 son los ciclos de inyección representados en la figura por el promedio y la dispersión $\pm\sigma$.

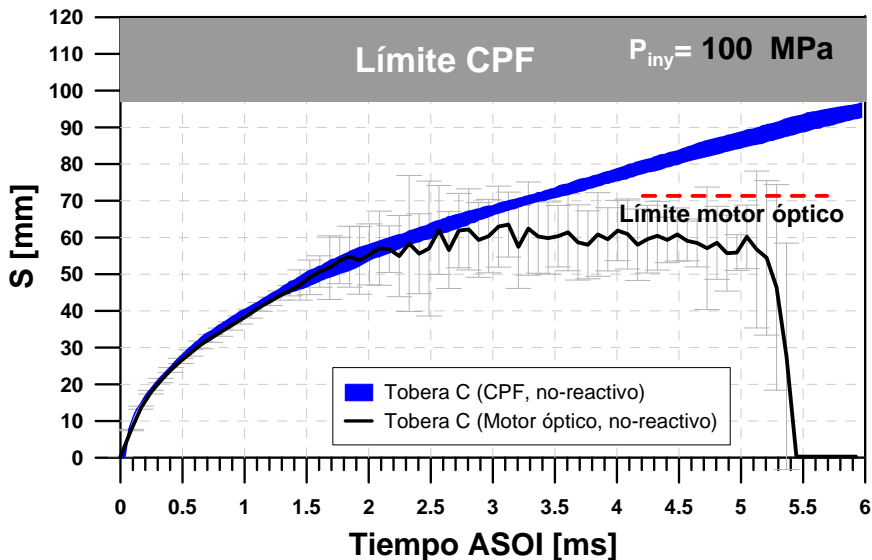


Figura 3.16.- Evolución temporal y desviación típica de la penetración. Chorros no-reactivos (bandas de desviación) y reactivos (área), desarrollados en el motor óptico y maqueta CPF, respectivamente. Condición AT de *Figura 3.6*; Tobera C y n-Heptano como combustible inyectado.

Partiendo del resultado neto del análisis de imágenes de penetración obtenidas en ambas instalaciones, tal como se observa en la *Figura 3.16* existe una escala temporal entre 0-1.4 ASOI en la que la penetración en ambas instalaciones es similar tanto en valores medios como en el nivel de dispersión, aunque la penetración del motor óptico es sensiblemente menor que la obtenida en la maqueta CPF. Mientras que a partir de aproximadamente el instante 1.8 ms ASOI, la penetración en la maqueta CPF tiende a estabilizarse sin sentido alguno en un valor alrededor de 60 mm con un dispersión muy alta. Mientras que en el caso de la maqueta CPF, la penetración resulta en una evolución propia de lo observado en la *Figura 2.13* o bien regida por leyes de escalados como las de las ecuaciones 2.6 y 2.7.

Es a partir de la relación existente entre el procesado digital y el resultado de penetración que se puede comprender el resultado obtenido en la evolución de penetración en el motor óptico de la *Figura 3.16*. La *Figura 3.17* ejemplifica con imágenes de instantes seleccionados dentro del evento de inyección la relación entre el proceso por el que transita el chorro y el resultado del procesado de imágenes de ensayos realizados en el motor óptico. Según avanza el proceso de inyección, la determinación de la máxima penetración se muestra como un proceso que aparentemente se estabiliza en un valor máximo debido fundamentalmente a que: (i) la mezcla aire-combustible es cada vez más pobre y por lo tanto el nivel de desviación de un haz de luz se comporta como a lo mostrado en la *Figura 3.10a* (etiqueta "3"). En apariencia, el ND del chorro es cada vez más similar al ND del fondo de la imagen, lo que repercute en que los algoritmos de detección de contorno no son capaces de separar adecuadamente el chorro del fondo, como se advierte en el instante 1286 μ s ASOI. (ii) el proceso de compresión y por ende el movimiento del aire dentro del motor tienden a impedir el avance de la mezcla aire-combustible como se puede advertir en el desplazamiento lateral del chorro en el instante 2326 μ s. Así como en un pequeño aumento de la penetración entre 2326 μ s y 1286 μ s, si se compara con el que ocurre entre este instante y 166 μ s. También de manera global, en la menor penetración previamente advertida en la *Figura 3.16* entre los instantes 0-1.4 ms ASOI.

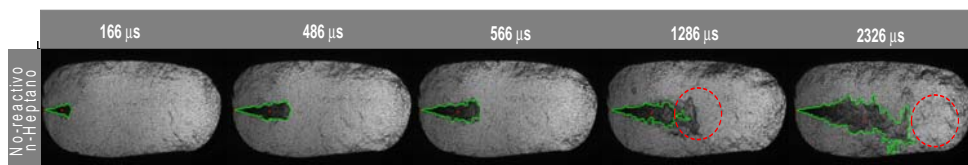


Figura 3.17.- Evolución del chorro en condiciones evaporativas no-reactivas (arriba) desarrollado en el motor óptico. Condiciones AT; Tobera C y $P_{iny} = 100$ MPa. *Nota:* Las etiquetas temporales están referidas al tiempo ASOI.

La *Figura 3.18* da cuenta de la variabilidad de la medida de penetración en las dos instalaciones experimentales empleadas y para el conjunto de condiciones de operación de la *Figura 3.6*. En la *Figura 3.18*, estadísticamente el coeficiente de variación (COV acrónimo en inglés) se usa como elemento comparativo entre los resultados entre ambas instalaciones en el estudio evaporativo no-reactivo. Fijando la atención en los valores máximos representados en las variaciones paramétricas de temperatura, densidad y presión de inyección. Resulta evidente que el COV determinado es en cualquier caso menor en la instalación CPF (líneas sólidas resaltadas en la figura), a pesar que los ciclos de inyección en motor óptico (15 repeticiones) son tres veces a los estudiados en la maqueta CPF (5 repeticiones). Por lo que se puede decir que el procesado de imágenes con el código de “textura” es lo suficiente robusto para dar cuenta de la máxima penetración del chorro indistintamente de la tasa de mezcla y/o transparencia del chorro.

En lo que se refiere a medidas de penetración en el motor óptico mediante el código LRT, tal como se observa en la *Figura 3.18* la dispersión está presente en todas las condiciones de operación. No obstante, bajo condiciones donde el dosado de la mezcla sea mayor debido a mayor presión inyección (100 MPa), menor densidad del aire (**BD**), menor temperatura del aire (**BT**) y mayor diámetro de tobera (Tobera B); existe una escala temporal desde el inicio de inyección hasta un máximo (varía según la condición entre 0.5-1.5 ms) en la que objetivamente las medidas de máxima penetración de chorro pueden resultar comparables a las obtenidas en la maqueta CPF. Es partir de ese instante donde la compresión, movimiento del aire dentro de la cámara de combustión y una mezcla cada vez más pobre aumentan la fluctuación ciclo a ciclo. Si bien puede parecer contradictorio para el lector, en los casos condiciones **BD**-Tobera B o el **AT/BT**-Tobera B la disminución del COV a partir de 1.5 ms no es producto de una medida más precisa de la máxima penetración del chorro sino que es consecuencia del que el chorro ha alcanzado el límite de la ventana, de manera análoga a la *Figura 3.16*, donde la estabilización de la penetración del chorro es producto de un dosado de mezcla más pobre y/o mayor grado de transparencia del chorro que lo hace indetectable por los algoritmos de procesado.

Debido a que en el estudio comparativo se prevén diferencias entre un chorro reactivo y el no-reactivo del orden de magnitud a la fluctuación observada en el motor óptico, el desarrollo presentado en el Capítulo 4 se basará en estudio de chorros y llamas desarrolladas en la maqueta CPF. En cambio, para el estudio planteado en Capítulo 5 sobre combustibles, las medidas se realizarán en el motor óptico, centrando el análisis en el autoencendido, cuando el chorro todavía no se ha visto demasiado afectado por el flujo del motor, así como en la fase estacionaria de la combustión.

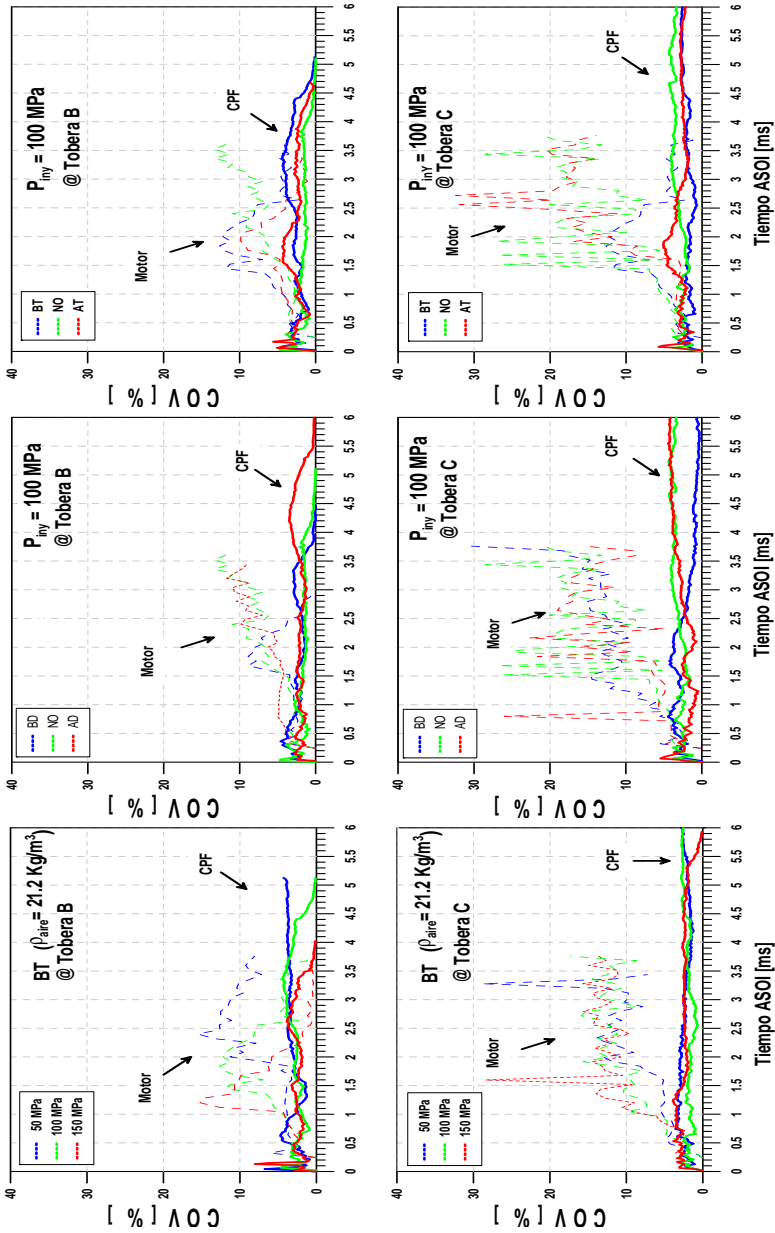


Figura 3.18.- Evolución temporal del coeficiente de variación COV dentro del estudio de penetración en condiciones no-reactivas. Combustible: n-Heptano. Variaciones: Temperatura (superior); Densidad (centro); Presión de inyección (inferior).

3.7. Conclusiones

La definición de la metodología de este trabajo ha permitido plantear las consideraciones experimentales que se han descrito a lo largo de este capítulo con la finalidad de establecer un estudio comparativo entre instalaciones para la consecución de objetivos específicos como la descripción de la evolución transitoria de chorros de inyección directa. Partiendo de la descripción de los entornos experimentales, de la estimación de la condiciones de presión, temperatura y densidad dentro de la cámara de combustión se han planteado soluciones de carácter experimental que repercuten directamente sobre el desarrollo del subsecuente procesado digital e análisis de imágenes obtenidas mediante la visualización schlieren. La contribución efectivamente se ha centrado en la búsqueda de una imagen de schlieren sin efectos de blooming por parte del hollín. También se han constatado las limitaciones inherentes a la aplicación de la técnica schlieren en el motor óptico, donde la velocidad del flujo es alta. A partir de todo lo anterior se derivan las siguientes conclusiones para el desarrollo de la tesis:

- La máxima longitud líquida medida en cualquier condición de operación resulta más corta en el motor óptico. Presumiblemente, la mayor densidad del aire y la mayor temperatura del combustible en la temperatura de la tobera dentro de la cámara de combustión derivan en una longitud líquida más corta.
- Los resultados obtenidos en la maqueta CPF relativos a la máxima penetración del chorro resultan más representativos de lo referido en la literatura de inyección en ambientes en reposo. En el motor óptico, el frenado del chorro durante la compresión, debido a la dilución de la mezcla con el aire y al flujo de aire entrante en la cámara introduce una importante desviación respecto a la CPF, que además va acompañada de un importante aumento de la dispersión experimental.

3.8. Referencias

- [1]. Engine Combustion Network (ECN),
<http://www.sandia.gov/ecn/cvdata/targetCondition/sprayA.php>.
- [2]. Engine Combustion Network (ECN),
<http://www.cmt.upv.es/ECN.aspx>.

- [3]. Macián V., Bermudez V., Payri R., y Gimeno J., “New technique for determination of internal geometry of a diesel nozzle with the use of silicone methodology”, *Experimental Techniques*, Vol. 27, pp. 39–43, 2003.
- [4]. Gimeno J., “Desarrollo y aplicación de la medida del flujo de cantidad de movimiento de un chorro Diesel”. *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2008.
- [5]. Nerva J. G. “An assessment of fuel physical and chemical properties in the combustion of a Diesel spray”. *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2013.
- [6]. Pickett L., Siebers D., “Soot in diesel fuel jets: effects of ambient temperature, ambient density, and injection pressure”. *Combustion and Flame*, Vol. 138, pp.114–135, 2004.
- [7]. Stone, R., “Introduction to internal combustion engines”. PALGRAVE MACMILLAN, 3rd Edition, 1999.
- [8]. Mancaruso E., Vaglieco B., “An experimental comparison of n-Heptane, RME and diesel fuel on combustion characteristics in a compression ignition engine”. *Fuel Processing Technology*, Vol. 107, pp. 44-49, 2013.
- [9]. Kastengren A. Zak, F. Powell C., Manin J., et al., “Engine Combustion Network (ECN): measurements of nozzle geometry and hydraulic behavior”. *Atomization and Sprays*, Vol. 22, pp. 1011-1052, 2012.
- [10]. Pastor J.V., Payri R., Gimeno J., Nerva J.-G., “Experimental study on RME blends: liquid-phase fuel penetration, chemiluminescence, and soot luminosity in diesel-like conditions”. *Energy fuels*, Vol. 23, pp. 5899-915, 2009.
- [11]. Pastor J. V., Payri R., García-Oliver J., Briceño F.J., “Schlieren methodology for the analysis of transient diesel flame evolution”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 6, p.p. 1661-1676, 2013.
- [12]. Meijer M., Galle J., Somers L. M. T., Griensven J., Verhelst S. “High-speed characterization of ECN spray A using various diagnostic techniques”. *SAE Paper* 2013-01-1616, 2013.
- [13]. Bosch W., “The fuel rate indicator: a new measuring instrument for display of the characteristics of individual injection”. *SAE Paper* 660749, 1966.
- [14]. Payri R., Salvador F.J., Gimeno J., Bracho G., “A new methodology for correcting the signal cumulative phenomenon on injection rate measurements”. *Experimental Techniques*, Vol. 32, pp. 46-49, 2008.
- [15]. Bracho G., “Experimental and theoretical study of the direct diesel injection process at low temperatures”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2011.
- [16]. Payri, R., Salvador F. J, Marti-Aldaravi P., Martínez-López. J., “Using one-dimensional modeling to analyze the influence of the use of biodiesels on the dynamic behavior of

- solenoid-operated injectors in common rail systems: Detailed injection system model". *Energy Conversion*, Vol. 54(1), pp. 90–99, 2012.
- [17].Manin J., Bardi M., Pickett L., Payri R., "Boundary condition and fuel composition effects on injection processes of diesel sprays at the microscopic level". *ILASS Europe 2013-457*, 2013.
- [18].Payri R., Salvador F. J., Gimeno J., Bracho G. "The effect of temperature and pressure on thermodynamics properties of diesel and biodiesel fuels".
- [19].Payri R., García J. M., Salvador F. J., Gimeno J., "Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics". *Fuel*, Vol. 84, pp. 551-61, 2005.
- [20].Bermúdez V., García J.M., Julia E., Martínez S., "Engine with optically accessible cylinder head: a research tool for injection and combustion processes". *SAE Paper 2003-01-1110*, 2003.
- [21].García J. M. "Aportaciones al estudio del proceso de combustión turbulenta de chorros en motores Diesel de inyección directa". *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2004.
- [22].Payri R., Salvador F. J., Gimeno J. de la Morena J. "Influence of injector technology on injection and combustion development - part 2: combustion analysis". *Applied Energy*, Vol. 88(4), pp. 1130-1139, 2011.
- [23].Pastor J. V., Payri R., García J. M., Briceño F. J., "Analysis of transient liquid and vapor phase penetration for diesel sprays under variable injection conditions". *Atomization and Sprays*, Vol. 21, pp. 503-520, 2011.
- [24].Zapata D., "Caracterización De Los Procesos De Inyección-Combustión Diesel Mediante Visualización Y Procesado Digital De Imágenes". *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2010.
- [25].Monin, C., "Caracterización del proceso de formación de hollín en una llama de difusión Diesel de baja temperatura". *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2009.
- [26].de la Garza O. "Estudio de los efectos de la cavitación en toberas de inyección Diesel sobre el proceso de inyección y el de formación de hollín". *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2012.
- [27].Bardi M., "Partial needle lift and injection rate shape effect on the formation and combustion of the diesel spray". *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2014.
- [28].Meijer M., Somers B., Johnson J., Naber J., et al. "Engine Combustion Network (ECN): characterization and comparison of boundary conditions for different combustion vessels". *Atomization and sprays*, Vol. 22 (9), pp. 777-806, 2012.

- [29].Bardi M., Payri R., Malbec L. M., Bruneaux G., et al. "Engine combustion network: comparison of spray development, vaporization, and combustion in different combustion vessels". *Atomization and sprays*, Vol. 22 (10), pp. 807-842, 2012.
- [30].Payri F., Molina S., Martín J., Armas O., "Influence of measurement errors and estimated parameters on combustion diagnosis". *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 26, pp. 226-236, 2006.
- [31].Armas O., Rodríguez J., Payri F., Martín J., Agudelo J. R., "Effect of the trapped mass and its composition on the heat transfer in the compression cycle of a reciprocating engine". *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 25, pp. 2842-2853, 2005.
- [32].Pastor J. V., Arrègle J., Palomares A., "Diesel spray image segmentation with a likelihood ratio test". *Applied Optics*, Vol. 40, pp. 1-10, 2001.
- [33]. Pastor J. V., Arrègle J., García J. M., Zapata L.D., "Segmentation of diesel spray images with loglikelihood ratio test algorithm for non-Gaussian distributions". *Applied Optics*, Vol. 46, pp. 888-899, 2007.
- [34].Pastor J. V., Pastor J. M., Gimeno J., Nerva J.-G., "The effect of biodiesel fuel blend rate on the liquid-phase fuel penetration in diesel engine conditions". *SAE Paper 2009-24-0051*, 2009.
- [35].Pastor J. V., Payri R., Gimeno J., Nerva J.-G., "Experimental study on RME blends: Liquid-phase fuel penetration, chemiluminescence, and soot luminosity in diesel-like conditions". *Energy Fuels*, Vol. 23, pp. 5899-915, 2009.
- [36].Settles G.S., Schlieren and shadowgraph techniques, Springer-Verlag, 2001.
- [37].Pastor J. V., Payri R., García J. M., Briceño F. J., "Schlieren methodology for the analysis of transient diesel flame evolution". *SAE Int. J. Eng.*, Vol. 6(3), pp. 1661–1676, 2013.
- [38].Marciniak, B., Wysocki M., "Discrimination between electronic and optical blooming in an insb focal-plane array under high-intensity excitation". *Infrared Physics & Technology*, Vol. 51(3), pp. 137-145, 2008.
- [39].Pastor, J., Payri, R., Garcia-Oliver, J., Nerva, J., "Schlieren measurements of the ECN-Spray A penetration under inert and reacting conditions,". *SAE Paper 2012-01-0456*, 2012.
- [40].http://www.newport.com/Colored-Glass-Filters/141135/1033/info.aspx#tab_Specification
- [41].Pastor J. V., García-Oliver J. M., Novella R., Vera-Tudela W., "Investigation on ignition and combustion characteristics of primary reference fuels under diesel engine conditions". *DER ARBEITSPROZESS DES VERBRENNUNGSMOTORS*, pp. 378.393, 2013.
- [42].Pickett L., Genzale C., Bruneaux G., Malbec L. et al., "Comparison of diesel spray combustion in different high-temperature, high-pressure facilities", *SAE Int. J. Engines*, Vol. 3(2), pp.156-181, 2010.
- [43].Naber J., Siebers, D., "Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays" *SAE Paper 960034*, 1996.

- [44].Pickett L., Hoogterp, L., “Fundamental spray and combustion measurements of JP-8 at diesel conditions”. *SAE Int. J. Commer. Veh.*, Vol. 1(1), pp.108-118, 2009.
- [45].Pickett L., Kook S., Williams T., “Visualization of diesel spray penetration, cool-flame, ignition, high-temperature combustion, and soot formation using high-speed imaging”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 2(1), pp. 439-459, 2009.
- [46].Pickett L., Kook S., Williams T., “Transient liquid penetration of early-injection diesel sprays”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 2(1), pp. 785-804, 2009.
- [47].Siebers D., Higgins B., Pickett, L., “Flame lift-off on direct-injection diesel fuel jets: oxygen concentration effects”. *SAE Paper 2002-01-0890*, 2002.
- [48].Pickett L., Siebers D., Idicheria C., “Relationship between ignition processes and the lift-off length of diesel fuel jets”. *SAE Paper 2005-01-3843*, 2005.
- [49].Pickett L., Siebers D., “Soot in diesel fuel jets: effects of ambient temperature, ambient density, and injection pressure”. *Combustion and Flame*, Vol. 138, pp. 114–135, 2004.
- [50].Higgins B., Siebers D., “Measurement of the flame lift-off location on di diesel sprays using OH chemiluminescence”. *SAE Paper 2001-01-0918*, 2001.
- [51].Siebers D., Higgins B., “Flame lift-off on direct-injection diesel sprays under quiescent conditions”. *SAE Paper 2001-01-0530*, 2001.
- [52].Lillo P., Pickett L., Persson H., Andersson, O. et al., “Diesel spray ignition detection and spatial/temporal correction”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 5(3), pp. 1330-1346, 2012.
- [53].Pastor J. V., López J. J., García J. M., Pastor J. M. “A 1D model for the description of mixing-controlled inert diesel sprays”. *Fuel*, Vol. 87(13-14), pp. 2871-2885, 2008.
- [54].Desantes J. M., Pastor J. V., García J. M., Pastor J. M., “A 1D model for the description of mixing-controlled reacting diesel sprays”. *Combustion and Flame*, Vol. 156(1), pp. 234-249, 2009.
- [55].Pickett L., Manin J., Genzale C., Siebers, D. et al., “Relationship between diesel fuel spray vapor penetration/dispersion and local fuel mixture fraction”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 4(1), pp. 764-799, 2011.
- [56].Desantes, J. M., Pastor J. V, García J. M., Briceño F. J., “An experimental analysis on the evolution of the transient tip penetration in reacting Diesel sprays”. *Combustion and Flame*, Vol. 161(8), pp. 2137-2150, 2014.
- [57].Siebers D., “Liquid-phase fuel penetration in diesel sprays”. *SAE Paper 980809*, 1998.
- [58].Siebers D., “Scaling liquid-phase fuel penetration in diesel sprays based on mixing-limited vaporization”. *SAE Paper 1999-01-0528*, 1999.
- [59].Musculus M., Kattke K., “Entrainment waves in diesel jets”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 2(1), pp. 1170-1193, 2009.

-
- [60]. Payri R., García-Oliver J. M., Bardi M., Manin J., “Fuel temperature influence on diesel sprays in inert and reacting conditions”. *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 35, p.p. 185-195, 2012.

Capítulo 4

Evolución transitoria de llamas Diesel

Contenido

4.1. Introducción.....	109
4.2. Cuantificación de longitud de lift-off mediante visualización schlieren de alta velocidad	110
4.2.1. Visualización schlieren como herramienta de medida del lift-off.....	111
4.2.2. Criterio de medida, selección y sensibilidad de LoL_s	114
4.2.3. Evaluación de LoL_s en estudio de llamas Diesel	117
4.3. Caracterización de la evolución temporal de la penetración	124
4.3.1. Definición de etapas en la evolución temporal del chorro Diesel en ambiente reactivo	125
4.3.2. Efecto de los parámetros de motor sobre la evolución de la penetración del chorro Diesel en ambiente reactivo.....	131
4.3.2.1. Presión de Inyección	133
4.3.2.2. Temperatura del aire.....	135
4.3.2.3. Densidad del Aire	136
4.3.2.4. Diámetro de tobera	138
4.4. Conclusiones	140
4.5. Referencias.....	142

4.1. Introducción

En el capítulo anterior se han definido los entornos empleados para la descripción temporal del chorro Diesel. Analizada la relación entre el movimiento de aire (en el motor óptico), el chorro Diesel y las herramientas de procesado abordado en la sección 3.7, este capítulo se centra en el análisis de llamas Diesel desarrolladas en ambientes cuasi-estacionarios como los generados en la maqueta CPF. Ello implica que la inyección se llevará a cabo en un ambiente de condiciones termodinámicas estacionarias y baja velocidad del flujo.

El enfoque del análisis se basa en la descripción de la llama, desde su formación durante el proceso de autoencendido, hasta adentrarse la fase de combustión por difusión. La originalidad del trabajo de investigación radica en la definición de parámetros cuantificadores de este progreso, que si bien son de carácter experimental se relacionan con el objetivo principal de este capítulo.

En primera instancia, se aplica la visualización schlieren como una herramienta alternativa para medidas de la longitud de lift-off de llamas Diesel a partir del análisis de la geometría de la misma. La idoneidad de esta medida es abordada en un análisis del criterio de selección del umbral de lift-off. A continuación se realiza un análisis de sensibilidad de la medida del lift-off a la variación de parámetros de combustión Diesel como la presión de inyección, la temperatura del aire y la composición química del combustible inyectado. El análisis está enfocado en dar énfasis a la robustez de esta medida frente a técnicas ampliamente aceptadas como la quimioluminiscencia del OH, tanto desde un punto de vista transitorio como estacionario. El estudio está enmarcado dentro de las condiciones de contorno adoptadas por la *Engine Combustion Network* descritas en el Capítulo 3 en conjunto con condiciones específicas de este trabajo de investigación.

En segunda instancia, el concepto de “*zero-blooming*” descrito en el capítulo anterior y aplicado a la visualización schlieren de la evolución transitoria de la llama permite analizar y establecer etapas características de la penetración de un chorro/llama Diesel. El análisis de las evidencias experimentales al cambiar las condiciones de operación (véase *Tablas 3.1*) permitirá establecer una conexión entre el proceso de combustión y la evolución temporal de la penetración de llama, así como establecer relación entre el desarrollo axial y radial de la llama, al igual que con el proceso de mezcla.

4.2. Cuantificación de longitud de lift-off mediante visualización schlieren de alta velocidad

Como se ha comentado en la revisión bibliográfica del Capítulo 2, existen distintas hipótesis de cuáles son los parámetros que controlan la ubicación de la longitud de lift-off. El planteamiento de Peters [1] indica que el lift-off se ubica en la región donde la velocidad de propagación del frente de llama premezclado se iguala a la velocidad convectiva del flujo. Existen trabajos más recientes, como el desarrollado por Pickett [2] en el que se establece una longitud de lift-off relacionada con la distancia recorrida por los paquetes de combustible desde el orificio de salida hasta el momento de su autoencendido, que además ha sido soportada por estudios previos que evidencian la presencia de radicales OH* en la zona donde finalmente se establece el lift-off de la llama Diesel [3]. Existen trabajos experimentales extensos que cuantifican con detalle los valores de dicha longitud característica [4],[5].

El entorno óptico de maquetas como la CPF y la limitación en la aplicabilidad de estudios simultáneos del proceso de inyección y combustión han motivado al estudio de la llama schlieren como elemento indicador del lift-off. La justificación de esta medida puede enfocarse a una reducción de coste y tiempo empleado en campañas de ensayo maximizando la información relativa al proceso de combustión. Sin embargo, hay líneas de investigación relacionadas con el proceso de auto-encendido y el carácter transitorio de la inyección, como el trabajo definido por Bardi [6], donde la rampa de la tasa de inyección (altamente transitoria) afecta el proceso de auto-encendido y también al lift-off. Aunque resulta difícil calibrar cuál es la relación de la variabilidad de la inyección y la evolución temporal del lift-off, ciertamente la metodología proporciona elementos para su análisis.

A partir de la visualización con schlieren, que es una técnica usada fundamentalmente para medir la penetración de la llama también se pueden extraer indicadores de la localización del lift-off a partir del fenómeno de expansión que ocurre en la base de la llama como consecuencia de la transición del estado inerte del chorro al reactivo. Partiendo de la base de medidas cuasi estacionarias, se establece la metodología de medida a partir de imágenes de schlieren que posteriormente se aplican el análisis desde punto de vista transitorio.

4.2.1. Visualización schlieren como herramienta de medida del lift-off

Durante la evolución temporal de la llama, como se observa en la *Figura 4.1* son fácilmente descriptibles las zonas inerte y reactiva del chorro. Desde el inicio del proceso de inyección, hasta el inicio del auto-encendido del mismo (1.170 ms ASOI), el chorro Diesel describe una morfología esencialmente de cono que crece con el tiempo, asumida comúnmente en la descripción de los procesos de mezcla de chorros Diesel [7]. Posteriormente al autoencendido, además de seguir el crecimiento en dirección axial, radialmente se produce un ensanchamiento del mismo como consecuencia del proceso de combustión.

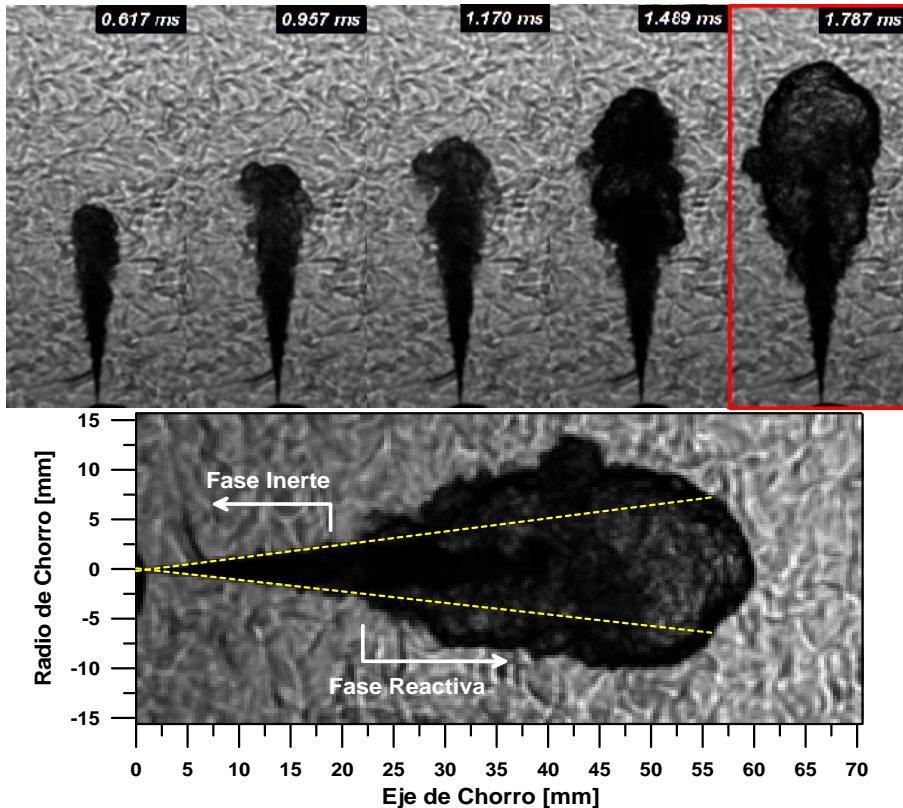


Figura 4.1.-Evolución temporal del volumen de mezcla y productos de combustión en maqueta CPF. Condiciones **NO** en la *Tabla 3.6*; $P_{iny}=50$ MPa y Tobera B.

Este ensanchamiento del chorro es característico de la zona donde ocurre el proceso de autoencendido, tal y como describen en análisis de los fundamentos del autoencendido en [8]. Aunque las medidas de quimioluminiscencia evidencian de

forma clara la ubicación del lift-off (véase sección 3.5.3), en imágenes de visualización schlieren, la concepción del lift-off no resulta muy evidente, dado que el principio de observación del efecto schlieren precisamente proviene de la interacción de gradientes de densidad [9] de un elemento (combustible inyectado en la cámara de combustión) con los rayos ortogonales que lo atraviesan, tal y como se ha descrito en la sección 3.5.2. Es la geometría de la llama el elemento definitorio del lift-off a partir de la imagen de schlieren y que resulta coincidente con la transición inerte-reactivo de la *Figura 4.1* y que también siguieron Pickett et al. en [9] al superponer un contorno schlieren sobre una imagen de quimioluminiscencia del OH* .

Descrito por Siebers [8], el proceso de ensanchamiento de la llama ocurre como consecuencia de disminución de la densidad local en la región de combustión. Adicionalmente, este proceso genera una reducción del englobamiento en el chorro y un consecuente aumento de la velocidad del chorro. Es por ello que en la imagen ampliada de la *Figura 4.1* se puede apreciar un ensanchamiento la frontera inerte-reactivo.

En el marco de la Engine Combustion Network, la utilidad de su amplia base de datos permite a través de la *Figura 4.2* ilustrar al lector a través de campos de velocidad, los efectos del proceso de combustión aplicando la técnica PIV descrita en [10], bajo condiciones de operación de Spray-A (véase en la *Tabla 3.2* las condiciones del ensayo). En la figura, los vectores de velocidad en la zona interna del chorro han sido removidos, con la finalidad de resaltar los campos de velocidad resultantes en áreas fuera de la nube de mezcla aire-combustible. La línea vertical, marca la ubicación de la longitud de lift-off a través de la quimioluminiscencia del OH* (extraído de base datos de la ECN [11,12]).

Es notable la observación de corrientes de re-englobamiento de productos de combustión hacia las zonas aguas arriba del chorro y específicamente a la zona de longitud del lift-off. Tal observación es apreciable desde el inicio de combustión (véase parte superior *Figura 4.2*) hasta el final del proceso de inyección (véase parte inferior *Figura 4.2*). Es decir, que cabe esperar un desarrollo del proceso de combustión donde el re-englobamiento del chorro produce campos de velocidades que interactúan cerca de la longitud de lift-off y que desde la perspectiva óptica de schlieren permite delimitar zonas específicas del chorro como las inerte y reactivas previamente comentadas en la *Figura 4.1*.

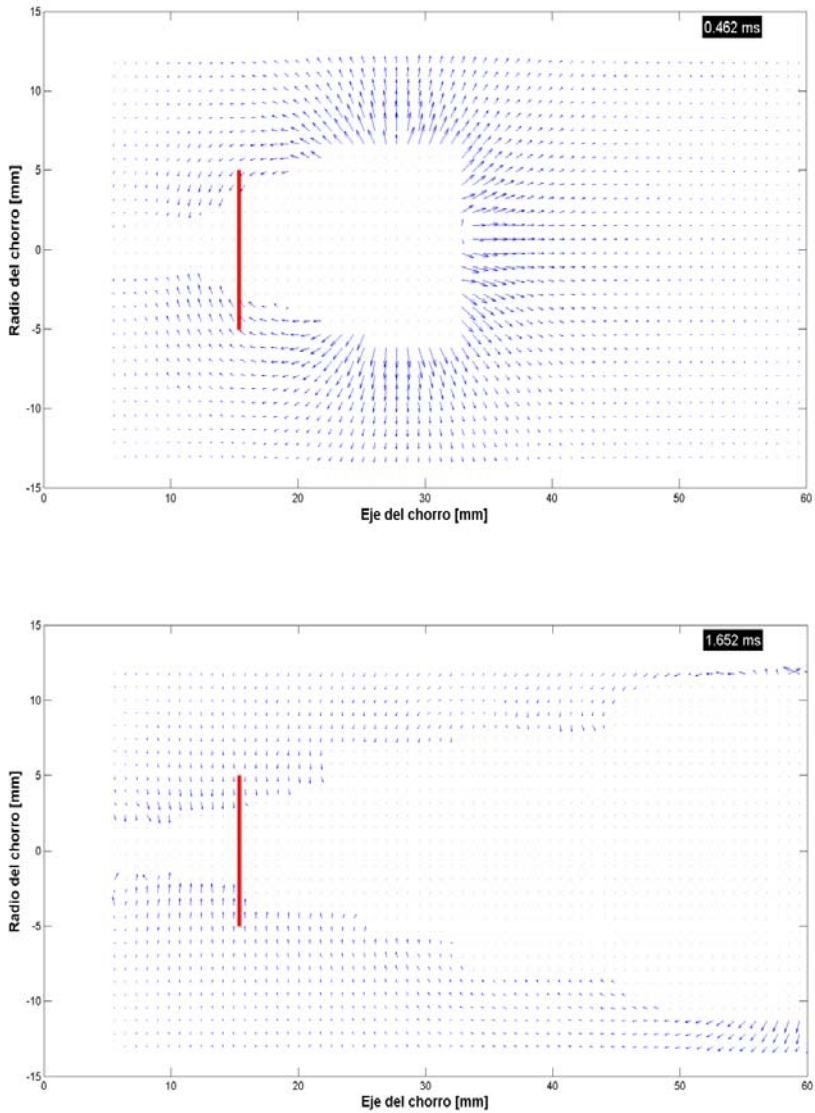


Figura 4.2.-Imágenes PIV del campo de velocidades en zona externa de la nube de mezcla aire-combustible durante el inicio de combustión del Spray-A. Arriba: Durante el inicio de combustión (0.462 ms ASOI). Abajo: Durante el final del proceso de inyección (1.652 ms ASOI). Líneas rojas verticales representan la medida de lift-off medido mediante quimioluminiscencia de OH*. Datos extraídos de base de datos disponible en la ECN [11,12].

4.2.2. Criterio de medida, selección y sensibilidad de LoL_s

Tal como se ha indicado en el capítulo 2, la ubicación de la longitud de lift-off suele ser cuantificada en base a la radiación a 306 nm, marcadora de la presencia del radical OH*. En cambio, la metodología de detección del lift-off basado en una imagen schlieren se enfoca en el carácter geométrico de la llama, en zonas aledañas a aquellas donde la mezcla aire/combustible se considera en la fase reactiva, para lo que se debe:

1. Detectar el contorno reactivo previo procesado de las imágenes de schlieren obtenidas mediante la aplicación de la metodología “Textura” descrita en la sección 3.5.2.3.
2. Definir la fase inerte del chorro mediante el mejor ajuste derivado a través del algoritmo del error de mínimos cuadrados (parte superior de la *Figura 4.3*). Esta zona es definida por el 80% de una longitud introducida por el usuario como estimación inicial del lift-off.
3. Definir en cada posición del eje de chorro (X), la diferencia en la sección de transversal ΔR_s definida como $\Delta R_s = R_{\text{react}} - R_{\text{no-react}}$, donde R_{react} proviene del contorno reactivo detectado y $R_{\text{no-react}}$ proviene de la extrapolación del ajuste lineal al contorno inerte del chorro.
4. La longitud de lift-off se define como la distancia desde el orificio de inyección a la ubicación donde el ensanchamiento ΔR supera un determinado valor umbral, expresado en términos del valor máximo de dicho ensanchamiento.

La *Figura 4.3* muestra la evolución de ΔR a lo largo del eje del chorro. En ubicaciones de la zona inerte, cercanas a la tobera, la evolución de ΔR_s es aproximadamente cero. Mientras que en la parte reactiva ΔR_s en primera instancia aumenta hasta un máximo y luego disminuye progresivamente nuevamente a cero. El umbral para la detección del lift-off se hará precisamente en base a un porcentaje del ΔR_s máximo alcanzado.

La definición de un criterio de selección robusto y efectivo para la extracción longitud de lift-off a partir de imágenes de schlieren carece de documentación, acerca de cuál es la mejor aproximación para definirlo. Por lo que a ojos del lector puede parecer un criterio meramente aleatorio. Sin embargo, resulta fundamental la similitud entre la descripción de la *Figura 4.3* con lo observado con la aplicación de técnicas estándar [4].

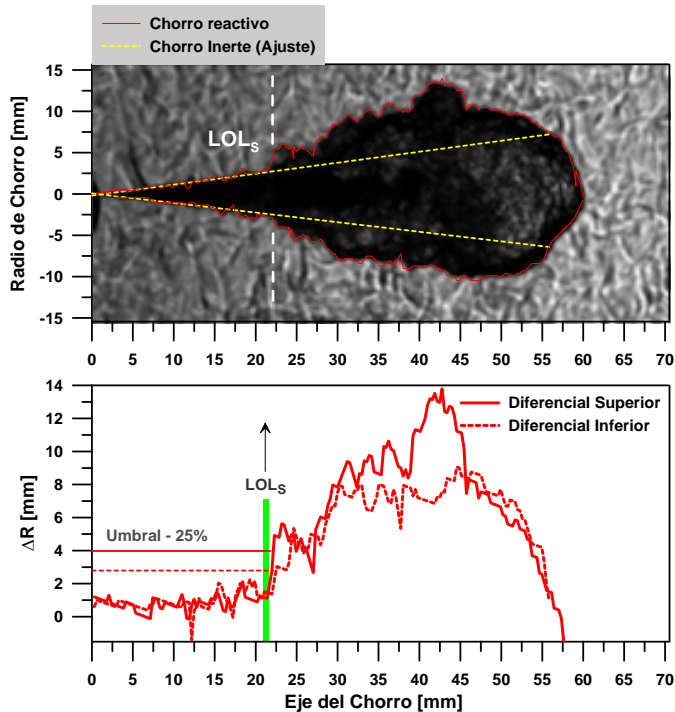


Figura 4.3.- Definición de medida instantánea de lift-off. Tiempo ASOI: 1.787 ms. Condiciones **NO** en maqueta CPF de la **Tabla 3.6**. $P_{iny} = 50$ MPa, Tobera B. Reactivo (línea roja sólida) y contorno lineal inerte (línea punteada amarilla). **Bajo:** Contorno detectado y determinación del lift-off a partir de la imagen schlieren.

En la **Figura 4.4** se muestra la evolución del factor ΔR_s de cada una de las imágenes procesadas que conforman el evento de inyección de las condiciones de operación **NO** (ver **Tabla 3.6**). La evolución, similar a la de la quimioluminiscencia de radicales OH^* (véase **Figura 3.13**) referida en la zona definida entre los 17.5 mm y 22.5 mm del eje del chorro partiendo de una evolución casi-plana del incremento radial, es en la zona previamente mencionada donde se denota un crecimiento notable de ΔR_s (líneas discontinuas en la **Figura 4.4**). Como se muestra en la parte inferior de la **Figura 4.3**, la longitud de lift-off schlieren LoL_s se define a partir de la evolución temporal de ΔR_s .

Basado en estas observaciones, se ha abordado la sensibilidad de la medida de LoL_s en relación a la selección del umbral de detección en la **Figura 4.4**, basándose en una imagen de ejemplo (línea discontinua de trazo grueso) para la cual se ha ido variando el umbral. Se observa claramente que los umbrales superiores inferiores al 20% y superiores al 40% del máximo ensanchamiento no

se corresponden con un umbral atribuible al LoL_s . Bien porque resultaría un lift-off localizado en la zona no-reactiva del chorro (10-20% umbral) o la medida sería propia de una locación de atribuible a la zona reactiva (40-50% umbral).

En consecuencia, se ha establecido que: *la longitud de lift-off schlieren (LoL_s) se establece como la distancia desde la tobera hasta la locación donde ΔR es igual al 25% de su máximo valor. Este proceso es repetido en las mitades superiores e inferiores del contorno schlieren. La longitud LoL_s en la Figura 4.3 representa el valor promedio de ambas medidas.*

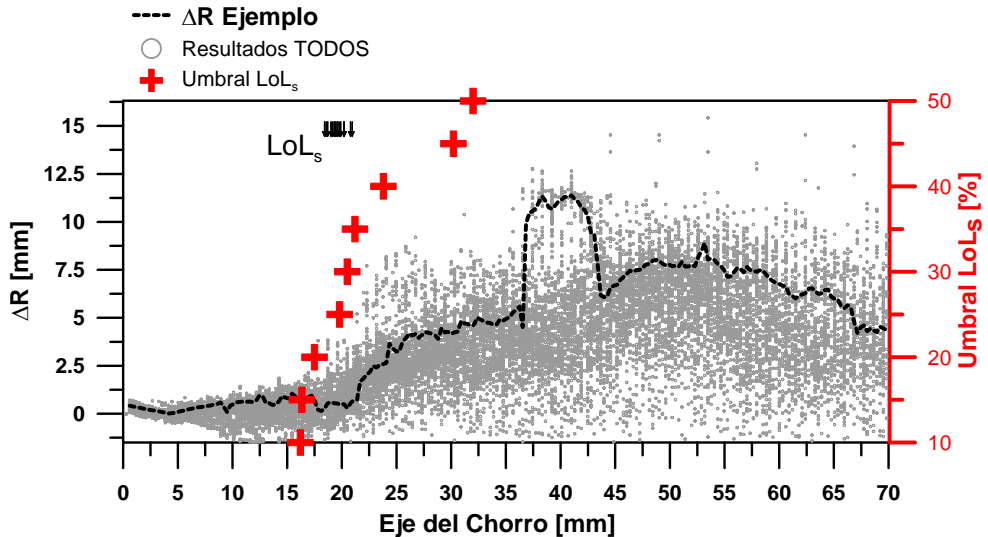


Figura 4.4.-Umbral definitorio del LoL_s (símbolos rojos). Medida de LoL_s de todo el evento de inyección de **Figura 4.1** (Símbolos). Ejemplo de procesado (línea punteada) y rango mínimo/máximo de variación medidas de LoL_s (área abarcada por flechas).

Tal como se indica en la **Figura 4.4**, el análisis de todas las imágenes del evento de inyección con un umbral del 25% resulta rango de variación entre la máxima y mínima medida de LoL_s es de ± 2.5 mm (véase flechas en la parte superior derecha **Figura 4.4**). Tal variabilidad, si bien es específica para el estudio en cuestión, resulta asumible dentro de las dispersiones propias de medidas de lift-off si atendemos a distintos estudios encontrados en la literatura [4,5]. El resultado muestra que la variabilidad de la medida es reducida, lo que indica que el lift-off tiene un carácter altamente estacionario. Aun así, el enfoque transitorio de esta medida que puede resultar como una medida novedosa y científicamente

interesante, por ejemplo, en situaciones de variaciones importantes de las tasas de inyección.

4.2.3. Evaluación de LoL_s en estudio de llamas Diesel

Atendiendo a la estandarización de técnicas de estudio adoptada por el ECN, es la quimioluminiscencia del OH^* la herramienta usualmente empleada en la determinación del lift-off de llamas Diesel a partir de la radiación del radical OH^* de larga exposición que resulta típico de un planteamiento cuasi-estacionario (véase sección 3.5.3). Sin embargo, la introducción de cámaras de alta velocidad en estudios de combustión también ha planteado la medida del lift-off a partir de la luminosidad del espectro visible con procedimientos como el descrito en la sección 3.5.4. A continuación se muestra el resultado del lift-off medido a partir de la técnica schlieren comparando con el lift-off a partir de luminosidad de amplio espectro. También se compara el lift-off schlieren promediado temporalmente con el determinado a través de la quimioluminiscencia del OH^* . Los resultados derivados de este análisis provienen del estudio enmarcado dentro de las condiciones estándar del spray-A en la *Tabla 3.2*. Incluyendo resultados provenientes de la maqueta CPF, bajo las condiciones de operación de la *Tabla 3.6* con n-Heptano como combustible inyectado y la Tobera B.

La *Figura 4.5* muestra por un lado los resultados de lift-off a partir de luminosidad, medidas tanto en *Sandia National Laboratories* como en *CMT* frente a las medidas de LoL_s . La resolución temporal de las medidas de schlieren mostradas en la figura muestra una gran similitud durante la fase cuasi-estacionaria de la combustión. Sin embargo, se observan diferencias en el inicio y fin de la evolución, producto del descarte de los transitorios de inicio y final del proceso de combustión (procesados desde 2 ms hasta 5 ms), donde el la geometría de la llama se ve afectada durante el autoencendido y el cierre del inyector. Además, en este último caso, la diferencia en la duración de inyección empleada en los distintos laboratorios es la que marca la diferente evolución.

En cuanto a la tendencia del LoL_s , resaltan las diferencias observadas en el caso $T_{aire} = 750$ K donde se encuentran las mayores diferencias relativas entre LoL_s y las medidas de amplio espectro obtenidas por la *CMT*. Observando la luminosidad, la tendencia del LoL a aumentar desde el instante 2.7 hasta 5.5 milisegundos es captada también por el LoL_s , con una diferencia constante de alrededor de 2 mm entre ambas curvas. Respecto a la luminosidad medida en *SNL*, las diferencias pueden atribuirse a las diferencias espectrales de las medidas de ambos institutos al igual que a dispersiones asociadas a las instalaciones (consultar [13,14] para más detalles en cuanto a la variabilidad de las medidas). En el resto de

casos mostrados en la figura, $T_{\text{aire}} = 800 \text{ K}$, 850 K , 900 K las diferencias observadas entre métodos se reducen en la evolución temporal como consecuencia del aumento de la temperatura del aire, resultando en diferencias menores a 1 mm dentro del mismo intervalo temporal anteriormente comentado. El análisis previamente comentado, coincide con la relación de LoL_s respecto a la medida de quimioluminiscencia de OH^* a partir de imágenes de larga exposición (véase cruces en la **Figura 4.5**), que como se ha comentado es la técnica de referencia. Así, en términos relativos LoL_s sub-estima para la temperatura de aire más baja (750 K) y da un resultado muy parecido a la medida de OH^* en el resto de temperaturas. Las evoluciones de la **Figura 4.5** potencian la capacidad de schlieren como técnica alternativa para el análisis de combustión de chorros de inyección directa. Específicamente en la caracterización de nuevas generaciones de inyectores donde la modulación de la tasa de inyección, puede jugar un papel importante en el proceso de mezcla y por ende, en el establecimiento y evolución de la zona reactiva de llamas.

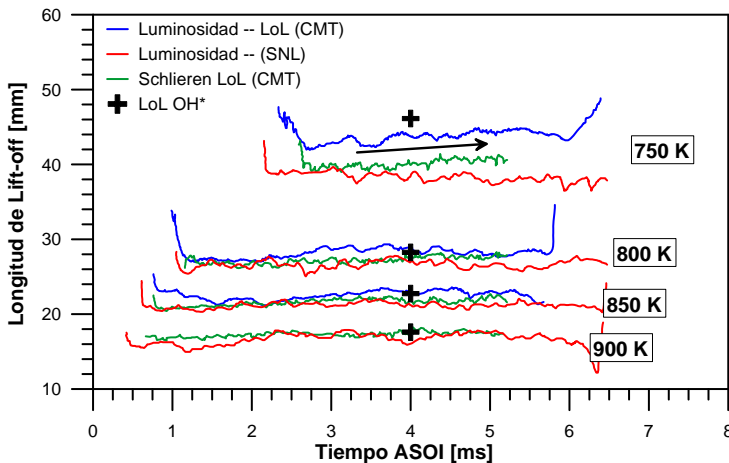


Figura 4.5.-Relación entre técnicas a lo largo de la evolución temporal del lift-off para la variación de la temperatura del aire de la **Tabla 3.2**. Medidas de schlieren registradas en CMT (verde). Medidas de lift-off a través de luminosidad, CMT (azul) y SNL (roja); $P_{\text{iny}} = 150 \text{ MPa}$.

Es decir, que podemos esperar una medida altamente fiable si se compara con el estándar de medida [4] tanto en cuanto se evalúen casos con una temperatura del aire mayor o igual a 800 K , donde las dispersiones observadas en el lift-off son propias de este tipo de análisis. Igualmente, las evoluciones de la **Figura 4.5** potencian la capacidad de schlieren como técnica alternativa para el análisis de combustión de chorros de inyección directa. Específicamente en la caracterización

de nuevas generaciones de inyectores donde la modulación de la tasa de inyección, puede jugar un papel importante en el proceso de mezcla y por ende, en el establecimiento y evolución de la zona reactiva de llamas.

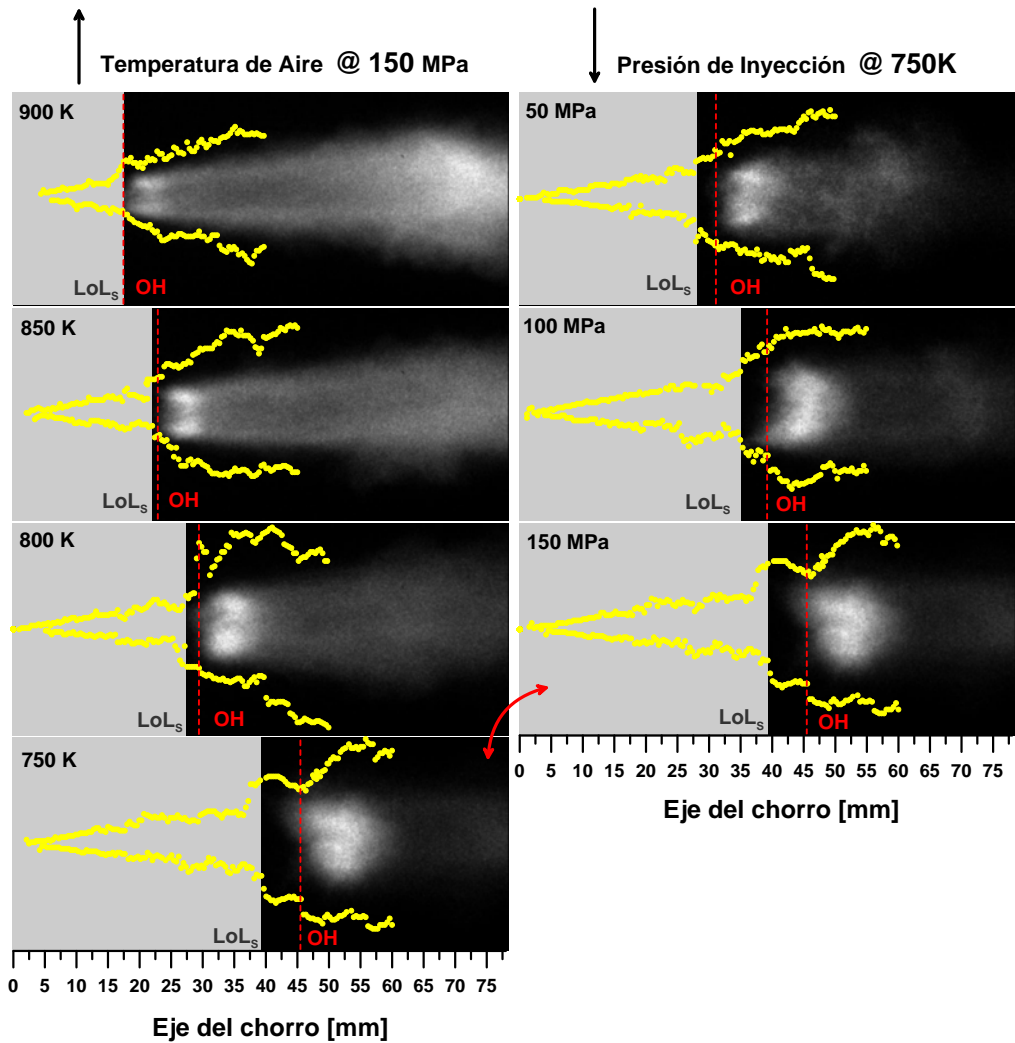


Figura 4.6.- Imágenes con tiempo largo de exposición (3ms) del OH* compuestas con contornos instantáneos detectados (puntos amarillos) en imágenes schlieren correspondientes a 3.3 ms ASOI. Zonas aguas arriba de LoL_s oculta por el área gris. Líneas rojas marcan el LoL_{OH} . Izquierda: Efecto de temperatura del aire. Derecha: Efecto de la presión de inyección.

El posible efecto de la temperatura del aire sobre las diferencias de lift-off entre técnicas se analiza desde el enfoque cuasi-estacionario en la *Figura 4.6*. La misma, presenta un muestra representativa de contornos de una llamas Diesel derivadas de la técnica de schlieren superpuestas sobre imágenes de quimioluminiscencia del OH* para los barridos de temperatura del aire y presión de inyección definidos en esta tesis. Al observar en la figura el efecto de la temperatura, se aprecia que al nivel más alto de temperatura (900 K) los resultados del lift-off son esencialmente los mismos entre ambas técnicas. Al disminuir la temperatura del aire, la longitud de lift-off se incrementa producto del retraso del proceso de combustión [15], que además está ligado con un aumento de la diferencia del lift-off detectado entre ambas técnicas que alcanza su máximo con la mínima temperatura del aire (750 K).

Desde la perspectiva experimental diferentes razones pueden justificar el comportamiento observado. Por ejemplo, un ajuste pobre del intensificador para captar la quimioluminiscencia del OH* puede inducir a tal observación. No obstante, los parámetros empleados para dicho elemento constan dentro de una serie de estudios [16] que contrastan la validez de las medidas realizadas, así como también de los parámetros de procesado de imágenes para la obtención de la medida de lift-off LoL_{OH} . Lo que sí es constatable bajo este enfoque, es que las máximas diferencias en la medida del lift-off se corresponden a condiciones de combustión de baja temperatura tal como se ha observado a nivel transitorio en la *Figura 4.5*.

En la *Figura 4.6*, también se puede observar que la señal de quimioluminiscencia acerca hacia el orificio de salida como consecuencia de la disminución de la presión de inyección, desde 150 MPa a una temperatura de aire constante de 750K. Esta tendencia es obtenida con la medición de ambas técnicas LoL_{OH} y LoL_s , siendo la sensibilidad de las dos metodologías similar a la observada a la variación paramétrica de temperatura. Y es que a una temperatura constante de 750 K, los procesos químicos deberían permanecer invariantes, incluso los campos de dosado no se modifican por modificación de la presión de inyección [17]. No obstante, la presión de inyección actúa en las tasas de disipación de energía y en los tiempos de residencia previa al autoencendido. En conjunto con la variación paramétrica de temperatura, la variación de presión de inyección modifica la estabilización de las zonas de baja y alta temperatura de la llama con una misma tendencia.

Mientras la *Figura 4.6* ilustra el efecto sobre el lift-off de la temperatura y la presión de inyección, la *Figura 4.7* muestra el conjunto de las medidas realizadas dentro de este estudio con ambas metodologías, que incluye variaciones de temperatura, presión de inyección y combustible. La línea solida representa la

bisectriz, donde ambas medidas mostrarían medidas idénticas. Cada símbolo corresponde a cada una de las ocho medidas para cada una de las temperaturas consideradas para el estudio paramétrico de spray-A en la *Tabla 3.2*. Las medidas de LoL_s se han calculado por medio de promediado temporal de los valores instantáneos del mismo periodo de apertura del obturados de la cámara dispuesta para observar la quimioluminiscencia del OH (desde 2 ms ASOI hasta 5 ms ASOI: excepto para temperaturas de aire de 750 K, dado que el retraso al auto-encendido era mayor a los 2 ms, de 3 ms ASOI hasta 5 ms ASOI es la ventana temporal de promediado que evita tomar en consideración el autoencendido (dada su alta transitoriedad). En la figura es notable que:

- Primero, la comparación resulta en un comportamiento relativamente lineal hasta los 25 mm de lift-off, donde los resultados de ambas metodologías produce esencialmente el mismo valor de lift-off.
- Segundo, a medida de que lift-off aumenta más allá de los 25 mm, se observa una tendencia no-lineal. En este caso, a través de LoL_s se determina un lift-off más corto que el obtenido por LoL_{OH} . Las divergencias son máximas en condiciones de temperaturas bajas (750 K) y alta presión de inyección (150 MPa) tal como se ha establecido en las *Figura 4.6*.

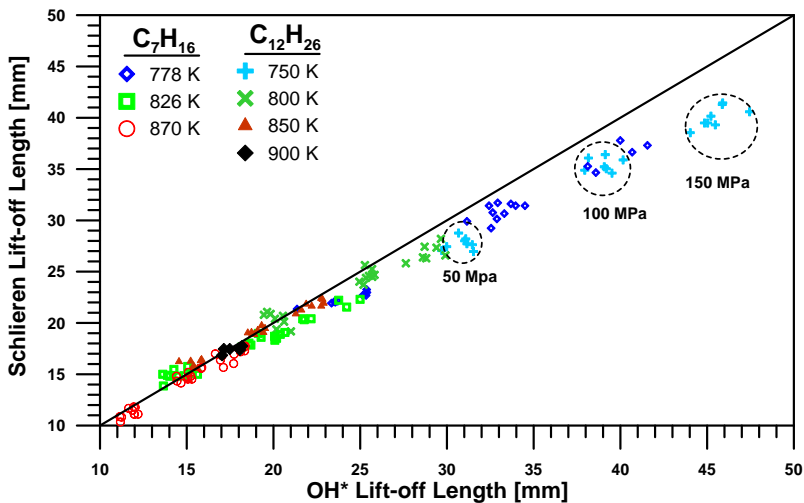


Figura 4.7.-Comparación cuasi-estacionaria de schlieren LoL_s , y la medida LoL_{OH} . Los símbolos se refieren a la variación de temperatura del estudio de la *Tabla 3.6*. $\rho_{aire} = 22.8 \text{ kg/m}^3$ y presión de inyección. LoL_s es el promediado temporal a lo largo del tiempo de exposición de la cámara destinada a registrar la quimioluminiscencia OH^* .

Aunque en gran medida la población de datos mostrada en la **Figura 4.7** muestra las tendencias observadas, existen medidas puntuales por debajo de la frontera de 25 mm donde la tendencia se revierte. Es en este punto donde la turbulencia del chorro/llama Diesel, así como los efectos de expansión radial pueden considerarse importantes dado que la existencia de radicales OH* en condiciones óptimas de visualización (ganancia maximizada en cámara de quimioluminiscencia) es improbable y/o no cuantificable ópticamente. Sin embargo, las diferencias existentes (aproximadamente 1-2 mm) pueden considerar como parte de la variabilidad estadística de la medida de lift-off en llamas de difusión Diesel [4,5].

Es de práctica común asociar los mecanismos de establecimiento del lift-off siguiendo a Peters [1], que define el lift-off en la zona donde la velocidad de propagación del frente de una llama premezclada y la velocidad convectiva local se equiparan. Tal como establece la ecuación 1, U_0 es la velocidad de Bernoulli, f_{st} es la fracción de mezcla estequiométrica, D_t es la difusión térmica, S_L es la velocidad de propagación del frente de llama en condiciones laminares y, k es la constante de proporcionalidad.

$$LoL = k \cdot \frac{u_0 \cdot f_{st} \cdot D_t}{s_L^2(f_{st})} \quad (1)$$

Siebers[3] extendió esta teoría al estudio de chorros Diesel con la inclusión de términos adicionales que consideran el ángulo de chorro:

$$LoL = k \cdot \frac{u_f \cdot f_{st} \cdot D_t}{s_L^2(f_{st})} \cdot \frac{1}{\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (2)$$

Bajo la consideración que la velocidad de combustión y la difusividad son dependientes de la temperatura, presión y propiedades del combustible, los modelos empíricos se pueden reducir a expresiones más sencillas. En el caso de los experimentos aquí desarrollados, la densidad del ambiente es constante y los efectos introducidos por el ángulo de chorro son desestimados debido a la incertidumbre de tal medida con la aplicación de medidas schlieren (tal como se ha avanzado en las secciones 2.3.3 y 2.5). Por otra parte, los efectos de las propiedades del combustible se tratan de forma simplificada por medio de correlaciones independientes para cada combustible empleado.

$$LoL[mm] = k \cdot U_0^a [m/s] \cdot T_{aire}^b [K] \quad (3)$$

El análisis estadístico de la **Tabla 4.1.** muestra los resultados obtenidos del estudio paramétrico. En este caso los valores de la constante k de los trabajos citados no se han incluido dado que estos contemplaban estudios paramétricos que incluían variables como, la densidad del aire y/o diámetro de tobera, también incluidas en la correlación, con lo que los valores de la constante k no son comparables a la de la expresión aquí empleada. En general, los coeficientes obtenidos a partir de una regresión lineal de mínimos cuadrados muestra un alta significancia del modelo indistintamente de la técnica usada para medir el lift-off de llamas como es plasmado por un alto $R^2 > \%97$. También es apreciable que las observaciones comentadas en la **Figura 4.7** para condiciones extremas de presión de inyección y temperatura del aire se ven confirmadas para toda la población de datos. Así, LoL_{OH} y LoL_s están relacionadas con exponentes de velocidad i.e. presión de inyección muy similar, mientras que el exponente de temperatura para medidas de LoL_{OH} es mayor, indicando una sensibilidad más alta del lift-off hacia este parámetro.

Parámetro	Cte	u_0	T_{aire}	% R^2	ECM
Exponentes	-	a	b	-	-
Pickett et al. [2]	-	1	-3.74	-	-
Payri et al. [18]	-	0.88	-5.26	-	-
OH-C ₁₂ H ₂₆	1.81 E+15	0.75	-5.42	98.39	1.10
OH-C ₇ H ₁₆	9.61E+13	0.71	-5.04	93.38	0.78
schlieren-C ₁₂ H ₂₆	1,30E+13	0.61	-4.60	98.58	0.80
schlieren-C ₇ H ₁₆	7,15 E+13	0.64	-4.91	95.07	0.58

Tabla 4.1.- Exponentes de escalado de LoL_s y LoL_{OH} encontrados en el análisis estadístico del modelo empírico de la ecuación 1.- Incluye condiciones de operación de la **Tabla 3.6** y condiciones de Spray-A definidas por la ECN, definidas en la **Tabla 3.2.**

Cuando los resultados del modelo (e.g. n-dodecano) son comparados con datos reportados por Payri et al. [18] en la **Tabla 4.1** (desarrollado con la misma metodología y con un entorno experimental muy similar), se puede observar una alta consistencia de los modelos obtenidos. En términos de velocidad de inyección, los exponentes encontrados varían desde $u_0^{0.71}$ hasta $u_0^{0.75}$ dependiendo del combustible, comparado con $u_0^{0.88}$ en [18]. Mientras que la tendencia de la

temperatura del aire varía desde $T_{\text{aire}}^{-5.42}$ y $T_{\text{aire}}^{-5.04}$ dependiendo del combustible, comparado con $T_{\text{aire}}^{-5.26}$ en [18]. Aunque los exponentes obtenidos no se corresponden con los obtenidos en el trabajo de Pickett et al. [15], ($u_0^{0.1}$ y $T_{\text{aire}}^{-3.5}$), no se debe perder de perspectiva el hecho que la naturaleza empírica de tales correlaciones puede ser la fuente de las diferencias observadas ya que las propiedades de los combustibles y diámetros de tobera, son parámetros que varían entre entornos experimentales así como también los procedimientos de procesado de imágenes pueden contribuir a las diferencias observadas entre métodos de medidas y diferentes autores.

Pickett et al. [15] ha observado que el estado cuasi-estacionario de la llama es de alguna manera contradictorio con el hecho de que el histórico del flujo que sale por el orificio puede cambiar el lift-off a lo largo de la inyección, ubicando finalmente el lift-off aguas arriba de la zona las primeras regiones donde se observa el auto-encendido. De hecho, cuando el auto-encendido es provocado aguas arriba de la longitud cuasi-estacionaria por medio de la inducción de plasma [19], ha demostrado que es necesaria una escala temporal muy alta ($> 10\text{ms}$) para alcanzar el mismo lift-off observado en experimentos de auto-encendido natural. Además, hay indicaciones que los inyectores usados por la comunidad **ECN** tienen una aguja que oscila [20]. Estas oscilaciones pueden inducir cambios en el proceso de mezcla aire-combustible así como en la ubicación del auto-encendido. Es por ello que estas observaciones son una explicación razonable de la tendencia no-lineal de los exponentes de la velocidad de inyección en la *Tabla 4.1*, así como en la variabilidad temporal de LoL_s . Aún más, el uso de medidas con resolución temporal ayuda también en el entendimiento de cómo el carácter transitorio de la inyección afecta la medida de lift-off de llamas.

4.3. Caracterización de la evolución temporal de la penetración

En este apartado se va a analizar la evolución de la penetración del chorro a lo largo del proceso de inyección, de manera que se definan los cambios que ocurren entre el caso inerte y reactivo. El estudio se ha realizado en la maqueta CPF, empleando como combustible n-Heptano, por su menor propensión a formar hollín y así evitar efectos indeseados de blooming en la imagen schlieren.

4.3.1. Definición de etapas en la evolución temporal del chorro Diesel en ambiente reactivo

Tomando en cuenta la limitación especial impuesta por los 105 mm de área de visualización efectiva (distancia desde la punta de la tobera hasta el límite de la ventana) de la maqueta CPF, la condición base para el análisis de esta sección se ha seleccionado dentro de la matriz de ensayo en la *Tabla 3.6* como aquel donde la evolución de la llama se puede observar por mayor periodo de tiempo/espacio. En la práctica, esto significa un caso de muy bajo tiempo de autoencendido (temperatura/densidad de aire alta) y desarrollo del chorro Diesel más lento (baja presión de inyección y menor diámetro de tobera). Con estas consideraciones, se ha seleccionado la combinación de condiciones ambientales AT en la *Tabla 3.6*, presión de inyección de 50 MPa y diámetro de tobera $d_0 = 82 \mu\text{m}$. Finalmente, aunque la escala temporal visualizada va más allá del final de la inyección (EOI), el análisis aquí presentado al igual que en el análisis previo de LoL_s está enfocado al periodo donde el momento de la llama es significativo, y los efectos transitorios que ocurren al final de inyección se han descartado.

Desde la *Figura 4.8* hasta la *Figura 4.10* muestra la información experimental que ayuda a identificar las diferentes etapas de evolución transitoria de la llama Diesel. En el caso de la *Figura 4.8*, se muestran imágenes instantáneas compuestas con mitades de chorros inertes y reactivos, que incluyen superpuestos los contornos schlieren detectados con la finalidad de ayudar en su visualización. Por otra parte, la *Figura 4.9* (arriba) incluye la evolución temporal de la penetración tanto en condiciones inertes como condiciones reactivas. Las líneas sólidas representan la evolución temporal promedio, mientras que el área coloreada representa \pm una desviación estándar. Para estas condiciones, el coeficiente de variación (desviación estándar de la población dividida por el promedio de la misma) es menor al 4% a lo largo de todo el proceso de inyección tanto en condiciones inertes como en condiciones reactivas para todas las condiciones parte de este estudio.

El desarrollo temporal de la penetración de chorros Diesel en condiciones inertes se establece a partir de la teoría de chorros gaseosos, que aplicado a un caso cuasi-estacionario establece que la evolución de la penetración sigue una ley temporal descrita según la ecuación 4:

$$S_i = k_i \cdot \sqrt{d_{eq} \cdot u_0 \cdot t} \quad (4)$$

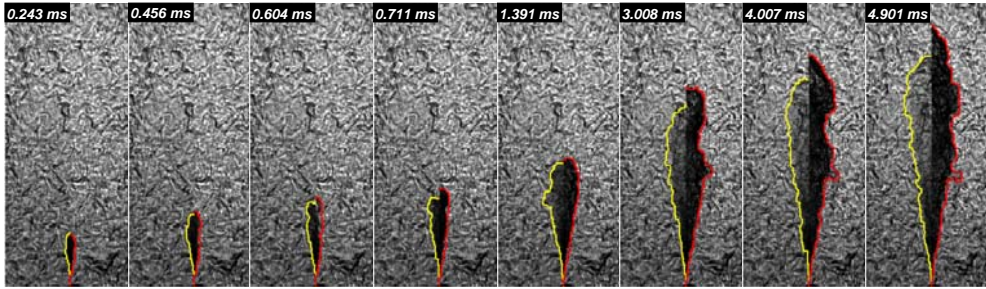


Figura 4.8.- Imagen compuesta de la penetración inerte (imagen-contorno en mitad superior) y reactiva (imagen-contorno en mitad inferior) para las condiciones AT de la **Tabla 3.6**. Maqueta CPF y $P_{iny} = 50$ MPa, diámetro de Tobera C ($d_0 = 82 \mu\text{m}$).

Donde, d_{eq} es el diámetro equivalente, u_o es la velocidad de inyección, t es el tiempo después del inicio de la inyección y, k_i es la constante de proporcionalidad. El posterior análisis indicará que el cociente entre penetraciones reactivas y no-activas es un parámetro cuantitativo conveniente para establecer una comparación de la que se prevé aportar en el entendimiento de la evolución temporal de llamas Diesel. Por ello, el cómputo de tal relación en cada instante temporal se ha incluido en la parte baja de la **Figura 4.9**. Finalmente, la **Figura 4.10** muestra la evolución temporal del cociente entre el ángulo de chorro reactivo vs. no-reactivo, en conjunto con imágenes seleccionadas de las condiciones AT previamente mostradas en la **Figura 4.7**.

De manera global y tal como se ejemplifica con la **Figura 4.8**, la evolución temporal de la penetración de llama experimenta diferentes etapas en la medida de que el proceso de inyección progresa. Como era de esperar, durante el proceso de mezcla previo al auto-encendido donde esencialmente las condiciones de inyección y de ambiente son iguales (dada la alta repetitividad y estacionalidad de las condiciones ambientales en la maqueta CPF, como se ha discutido en la sección 3.6), el caso reactivo no experimenta diferencia alguna cuando es comparado con el caso no-reactivo en la imagen de 0.456 ms en la **Figura 4.8**. Inspeccionando la secuencia de imágenes indica que el proceso de autoencendido denotado por expansión radial de la llama ocurre en el instante 0.604 ms después del inicio de inyección (SOI). En este punto, el chorro reactivo experimenta un repentino crecimiento de la penetración cuando es comparada con el chorro no-reactivo, alcanzando una relación máxima S_r/S_i en el instante de 0.711 ms, lo cual está obviamente conectado con una disminución de densidad local y una consecuente expansión de la mezcla aire-combustible. Luego de este máximo en penetración, el chorro reactivo experimenta una desaceleración soportada en la evidencia de que la penetración reactiva tiende a igualar la penetración del chorro no-reactivo en el instante 1.391 ms después de EOI. El ratio de penetraciones puede caer por debajo

incluso de la unidad, tal como se observa en la **Figura 4.9** durante una fase que se denominará de estabilización, donde no se aprecian diferencias significativas en la escala S_r/S_i . Seguidamente, el chorro reactivo avanza a una fase de aceleración, donde eventualmente se separa definitivamente del no-reactivo. Esta fase es también de alguna manera transitoria dado que el ratio de penetraciones S_r/S_i aumenta progresivamente en el intervalo de 2 a 4 ms después de SOI, para luego estabilizarse en un valor cuasi-constante en lo restante del proceso de inyección.

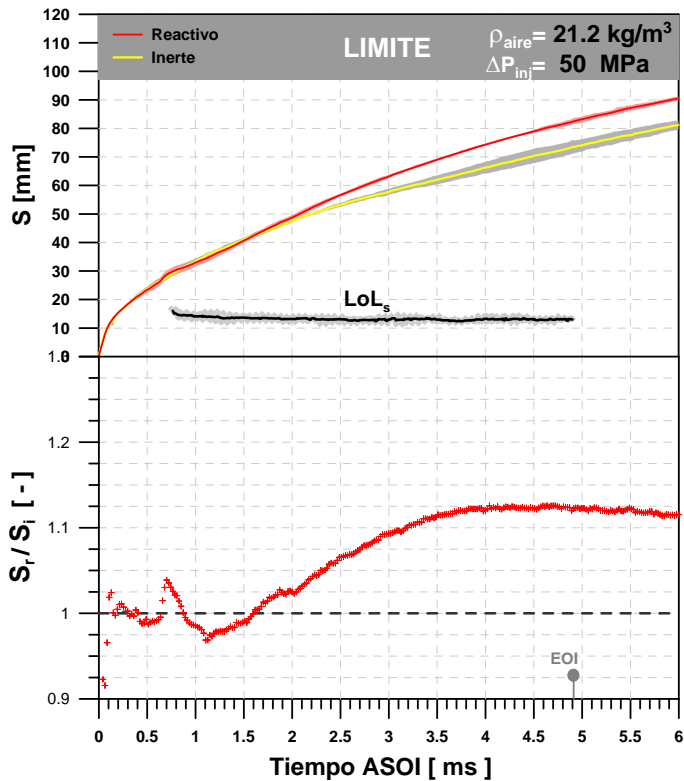


Figura 4.9.- Arriba: Evolución temporal de la penetración y medidas de lift-off LoL_s en condiciones AT de la **Tabla 3.6** (Maqueta CPF). Bajo: Evolución temporal del ratio de penetraciones (S_r/S_i). Diámetro de tobera $d_o = 82 \mu\text{m}$ (Tobera C).

Además de la penetración de chorro, que es una evaluación de la evolución axial, el análisis de la dispersión radial cuantificada en términos del ángulo de chorro puede contribuir información relevante a la evolución de la llama. Este parámetro se ha usado extensivamente en estudios para caracterizar la evolución radial de chorros inertes [17,21,22,23], a pesar de las incertidumbre relacionadas con la definiciones del mismo y de las bien conocidas limitaciones de la técnica de

schlieren para ubicar objetivamente el límite de chorro del flujo de fondo en una imagen [17]. Las imágenes en la *Figura 4.10* posibilitan la identificación de contorno bien definido en el chorro reactivo. Si bien es muy difícil discernir el significado real del contorno en términos de límites de densidad, velocidad o fracción de mezcla; se ha definido el ángulo de chorro reactivo que en su comparativa con el chorro inerte permite establecer un factor semi-cuantitativo de la expansión radial de llamas.

La definición del ángulo en condiciones inertes, Θ_i , se establece como el ángulo conformado por dos líneas rectas obtenidas por la regresión de mínimos cuadrados del 80% de longitud de la fase inerte del chorro (lo cual se ha obtenido a partir del análisis de LoL_s descrito en la 4.2.2). De manera similar, el ángulo que define el chorro reactivo Θ_r se ha definido como el ángulo encerrado entre dos líneas rectas obtenidas por medio del ajuste de mínimos cuadrados del contorno detectado entre la zona aguas abajo de la longitud de lift-off LoL_s y la longitud equivalente al 80% de la máxima penetración del chorro reactivo. Es importante destacar que la intersección/definición del ángulo reactivo ocurre en posiciones axiales positivas, lo cual hace la comparativa con el ángulo inerte difícil, puesto que en este caso las líneas de la regresión se intersectan en la punta de la tobera, o incluso más atrás, dando lugar al llamado “origen virtual” del chorro[24]. Es por ello que en lo sucesivo se hace referencia a la relación Θ_r/Θ_i que representa una medida física del grado de ensanchamiento del chorro derivado del proceso de combustión y su efecto en el desarrollo del chorro reactivo será revisado.

En consonancia con las fases previamente descritas para la penetración del chorro reactivo, durante el autoencendido y la fase de estabilización, el chorro experimenta una expansión radial en mayor proporción que la observada en la dirección axial. Basado en el promedio de los ciclos grabados, la máxima expansión radial es $\Theta_r/\Theta_i = 2.6$ en la *Figura 4.10*. Posteriormente, Θ_r/Θ_i decrece a lo largo del tiempo a un valor que se puede considerar como estabilizado en $\Theta_r/\Theta_i = 1.3$ que se prolonga hasta el EOI.

Tal como se ha comentado en las secciones 2.3.3 y 2.5, el ángulo de chorro es una medida altamente dispersa producto de la técnica de medida y/o la propia naturaleza transitoria del chorro, por lo tanto, el factor de expansión que resulta de la medida de dos ángulos no escapa a esta realidad científica tal como se puede observar en las diferentes inyecciones de la *Figura 4.10* (símbolos grises). Coincide la alta variabilidad del factor de expansión con la fase inicial de la combustión, donde se alcanzan en algunas inyecciones valores máximos de $\Theta_r/\Theta_i = 3.5$ (40% de variabilidad respecto al valor promedio), y por el contrario también aparecen inyecciones donde el factor de expansión es bajo, con valores pico que ocurren temporalmente retrasados (1.4 ms después de EOI) con $\Theta_r/\Theta_i = 2.0$. Sin embargo,

una vez alcanzada la fase de estabilización, la variabilidad del factor de expansión es sensiblemente menor (10% del valor promedio) y su valor final se puede identificar con un alto grado de significancia en 1.3.

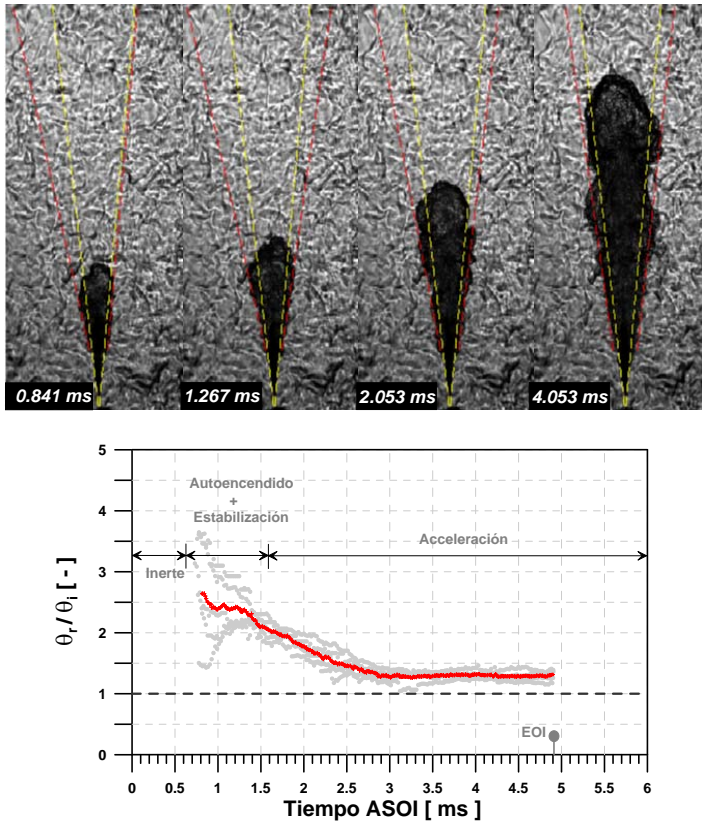


Figura 4.10.- Arriba: Superposición del mejor ajuste de contornos inertes (línea amarilla) y reactivos (líneas rojas). Bajo: Evolución temporal del ratio de expansión θ_r/θ_i para las condiciones AT de la **Tabla 3.6** (Maqueta CPF); $P_{iny}=50$ MPa; Tobera C.

Resulta evidente a partir de lo comentado, que la descripción de la expansión de un chorro reactivo es bastante diferente a la que es adoptada para un chorro inerte donde se define un ángulo de chorro cuasi-estacionario. Se puede afirmar que *el chorro reactivo tiene una expansión durante la fase inicial de combustión, y progresivamente tiende a estabilizarse en un valor similar al observado para un chorro inerte; tal estabilización ocurre antes de la fase cuasi-estacionaria de la penetración del chorro reactivo. Aproximadamente 3 ms después de SOI comparado con 4 ms después de SOI, respectivamente para las condiciones de operación AT.*

La evolución de la longitud de lift-off a partir del schlieren LoL_s se muestra en la parte superior de la **Figura 4.9**. Se observa un valor ligeramente mayor en el inicio de la combustión, que decrece a un valor cuasi-estacionario de LoL_s a lo largo de toda la inyección con una variabilidad reducida (comparando valores promedios con valores instantáneos), y que concuerda con observaciones con resolución temporal como las medidas de luminosidad de la **Figura 4.5**. Hay que tener en cuenta que las condiciones de operación y el combustible no son exactamente los mismos que en el apartado anterior, lo que podría explicar la diferencia de tendencias.

Partiendo de las observaciones comentadas previamente en esta sección, la evolución temporal del chorro reactivo puede definirse en cinco etapas características:

- I. *Fase No-reactiva*: Previa al autoencendido y donde la evolución del chorro es análoga al caso de inyectar en un ambiente sin oxígeno.
- II. *Fase de Autoencendido y Expansión*: Donde el volumen del chorro aumenta rápidamente (tanto axial como radialmente) producto del establecimiento del proceso de combustión.
- III. *Fase de Estabilización*: Donde la penetración del chorro reactivo progresa con una velocidad similar al chorro inerte. Bajo la hipótesis de conservación del momento del chorro, una caída de la densidad local producto de la combustión se traduciría en una mayor penetración del chorro reactivo. Sin embargo, este efecto es compensado por el incremento de volumen radial en la fase de autoencendido. Resultando, en que el chorro reactivo no penetra necesariamente más rápido que el caso inerte.
- IV. *Fase de aceleración*, donde la penetración del chorro reactivo progresa en mayor medida que el chorro inerte y, eventualmente despega respecto a la del chorro inerte. Durante este periodo, el ratio de penetraciones S_r/S_i aumenta con el tiempo.
- V. *Fase de llama cuasi-estacionaria*, donde el ratio de penetraciones alcanza un valor constante.

Es en esta última fase, donde la penetración del chorro reactivo obedece a la descripción cuantitativa regida por la ecuación 5, indicando que se ha llegado a un estado cuasi-estacionario en la evolución del chorro reactivo tal como se observa en la parte inferior de la **Figura 4.9** a partir de ~ 3.5 ms ASOI.

$$S_r = k_r \cdot \sqrt{d_{eq} \cdot u_0 \cdot t} \quad (5)$$

Siendo k_r una constante que contiene información relativa al proceso de mezcla y de combustión combinados. En este último caso, cuantifica la reducción en la tasa de englobamiento como consecuencia de la liberación de calor. Asumiendo la validez de las ecuaciones anteriores, el ratio de penetraciones S_r/S_i es equivalente al cociente de las constantes k_r/k_i .

4.3.2. Efecto de los parámetros de motor sobre la evolución de la penetración del chorro Diesel en ambiente reactivo

En este apartado, se va a analizar el efecto que las condiciones de operación del motor tienen sobre la evolución del chorro del caso de referencia analizado en el apartado anterior. Hay que indicar que en el pasado, la medida de lift-off se ha identificado como parámetro importante parámetro para la formación de hollín en llamas Diesel debido al control que mantiene sobre la cantidad de aire englobado en la base de la llama [27]. Así es como algunos autores hacen uso de ecuaciones semi-empíricas [5] para determinar el dosado relativo de secciones de la llama a largo de su eje con el fin de relacionarlo con los procesos de formación de hollín en llamas difusivas [28]. Bajo esta premisa, resulta lógico asumir que dicho englobamiento de aire también tiene efectos en el desarrollo global (geometría y productos) de la combustión, al menos durante sus fases iniciales. En consecuencia, se ha llevado a cabo la cuantificación de la composición de la mezcla a través de la implementación de las medidas de LoL_s en el modelo 1-D de la sección 3.6 para cuantificar el dosado relativo de la mezcla inerte en la base de la llama (ϕ_{LoL}) [24]. La *Figura 4.11* ejemplifica la determinación de ϕ_{LoL} . Para ello se parte de la curva de dosado en el eje obtenida en el modelo 1-D (figura derecha de la parte superior), y se particulariza el valor para la posición de lift-off experimental (valor LoL_s en la curva superior, parte izquierda). El procedimiento parte del ajuste de la penetración inerte alimentando al modelo 1-D con los parámetros descritos en la sección 3.6 y tal como se ha comentado en esa sección, variando el ángulo de chorro (Θ) hasta coincidir la penetración modelada con la experimental.

A la hora de calcular bajo condiciones reactivas, se han introducido en el modelo dos parámetros críticos a partir de las medidas experimentales (i) el inicio de combustión (SOC acrónimo en inglés) y (ii) el ángulo de chorro. En el caso mostrado en la *Figura 4.11*, el ángulo reactivo se ha determinado al igual que en el caso inerte comparando la penetración modelada con la experimental hasta conseguir el ajuste mostrado en la figura. Debido a que la penetración reactiva

atraviesa distintas etapas a lo largo de la inyección, los resultados experimentales sugieren que la calibración del ángulo usado en el modelo debe realizarse durante la fase final cuasi-estacionaria de la penetración y donde la evolución puede compararse de manera más precisa a la del chorro no-reactivo de acuerdo con la ecuación 5. Los resultados de calibración del modelo arroja un ángulo reactivo ($\Theta=25.5^\circ$) mayor al caso no-reactivo ($\Theta=22.5^\circ$) y que resulta en un ratio de expansión en el modelo ($\Theta_r/\Theta_i=1.13$) muy por debajo del observado experimentalmente ($\Theta_r/\Theta_i=1.3$). Aun así, este resultado es una evidencia más de un proceso de expansión radial que perdura incluso en la fase cuasi-estacionaria de la penetración del chorro reactivo.

Por otro lado, el modelado del inicio de combustión SOC de la *Figura 4.11* se ha simulado al inicio de la fase de aceleración de penetración del chorro. En la comparativa respecto a la ratio de penetración experimental, la transición en el modelado 1-D ocurre con más celeridad. En particular, el inicio de la combustión y la fase de aceleración no son captadas por el modelo y por esta razón el SOC del modelo se ha retrasado. Esta observación era esperable dadas las simplificaciones inherentes al modelo cinético del modelo 1-D. Como se ha comentado, el tiempo de auto-encendido es introducido por el usuario y la transición hasta una llama establecida es instantánea basándose en la aproximación de Burke-Schuman. Por lo que el modelo considera una transición instantánea entre el chorro inerte y el reactivo, con un cambio en la variable de progreso de tipo binario, pasando instantáneamente de 0 a 1 [7].

Con estas consideraciones, el modelo 1-D puede aún identificar la fase de aceleración experimental y la subsecuente fase cuasi-estacionaria (*fases IV y V*). Además, el ratio de penetraciones (S_r/S_i) muestra una aceleración similar a la experimentalmente observada, siendo las diferencias observadas principalmente debidas a un progreso de la química es mucho más rápido en el modelo. En el análisis detallado del modelo en [24], se ha mostrado un chorro inerte que penetra con un momento constante a lo largo de la sección y el eje del mismo. En el inicio de combustión, la transición inerte-reactivo crea un caída de la densidad local (también un ensanchamiento del chorro) que produce un desbalance del flujo de momento a lo largo del chorro y por lo tanto, de la penetración del chorro. Este efecto induce la fase de aceleración (*fase IV*) hasta que el flujo de momento se balancea coincidentemente con la fase de transición y cuasi-estacionaria de la penetración reactiva (*fase V*). Es importante resaltar que el modelo muestra un ratio de penetraciones que disminuye a lo largo del tiempo, pudiéndose derivar del hecho de una llama experimental diluida muy lejos de la punta de la tobera con una reactividad limitada respecto del modelo.

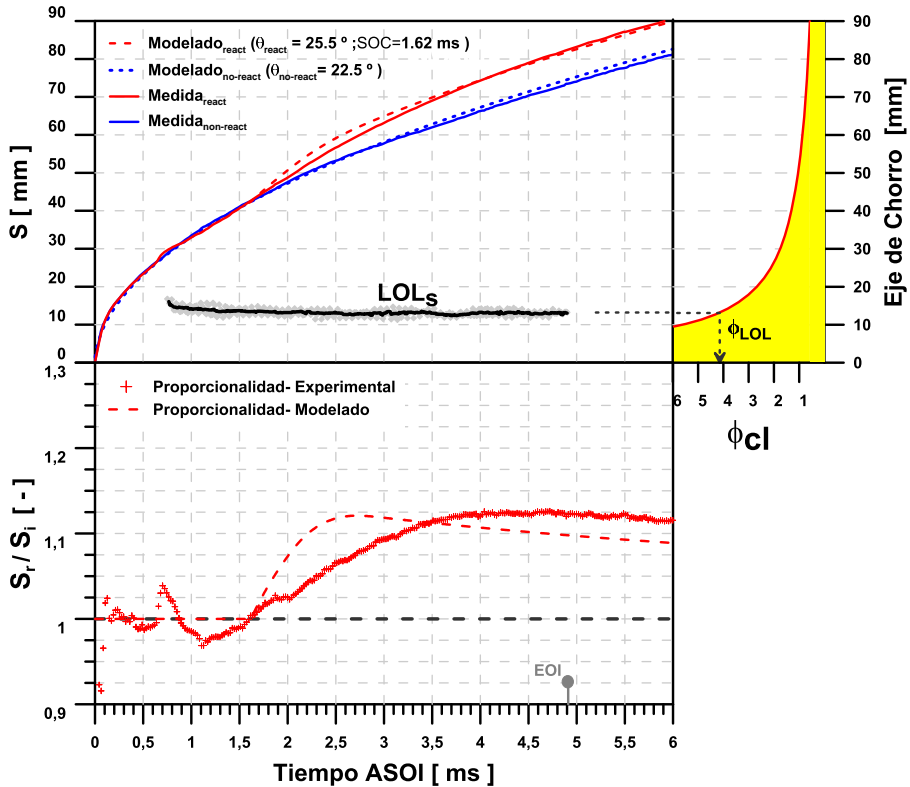


Figura 4.11.-Arriba-izquierda: Comparativa de penetración derivada de experimentación y de modelado 1-D; inerte (azul); reactivo (rojo) en la parte superior de la figura. Condiciones experimentales iguales a las de la **Figura 4.8**. **Arriba-derecha:** La evolución del dosado equivalente en el eje de chorro inerte se muestra con la finalidad de mostrar el cómputo del dosado equivalente en la locación del Lift-off (ϕ_{LOL}). **Bajo:** Comparativa de la evolución temporal del ratio de penetraciones experimental y modelado.

4.3.2.1. Presión de Inyección

La **Figura 4.12** muestra resultados de la variación de la presión de inyección para las condiciones de operación **AT** (ver **Tabla 3.6**), seleccionada para ganar en consistencia con las condiciones nominales previamente analizadas. En términos de auto-encendido, se puede observar que el incremento de la presión de inyección no tiene un efecto importante y/o apreciable en el inicio del proceso de combustión, tal que el pico inicial del ratio de penetraciones S_r/S_i coincide entre los niveles de presión de inyección (cambios en escalas temporales menores a $10 \mu\text{s}$ inapreciables en la figura). Sin embargo, este no es el caso de la expansión inducida por el proceso de combustión. Partiendo de las medidas de ángulo de chorro, la expansión

disminuye cuando aumenta la presión de inyección como consecuencia de una mayor tasa de mezcla aire-combustible y que se corresponde con los factores de escalado referidos en el la *Tabla 4.1*. Tal observación es contrastada por modelado unidimensional del chorro (descrito en la sección 3.5) que resulta en dosados relativos que disminuyen en la longitud del lift-off LoL_s , de acuerdo a la tendencia $\phi_{50}=4.1 > \phi_{100}=3.2 > \phi_{150}=2.6$. Como consecuencia, mezclas más ricas durante el auto-encendido resultan en una expansión radial Θ_r/Θ_i mayor.

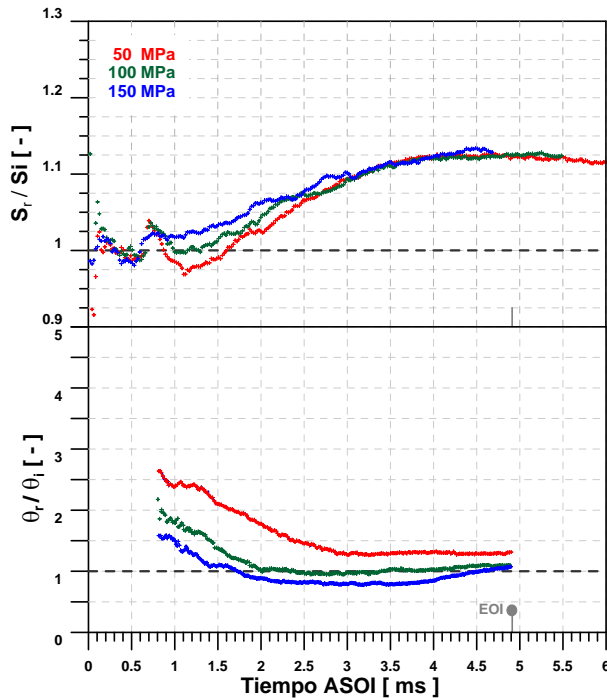


Figura 4.12.-Evolución de chorro reactivo para la variación paramétrica P_{iny} . Arriba: Evolución temporal del ratio de penetración (S_r/S_i). Bajo: Evolución temporal del ratio de expansión radial (Θ_r/Θ_i). La variación corresponde a la variación AT (Maqueta CPF) de la *Tabla 3.6*. Tobera C.

Respecto a la fase de estabilización, se observa que su duración es menor tanto en términos del ratio de penetraciones como del ratio de expansión radial, como consecuencia de aumentar la presión de inyección. Y es que los flujos de cantidad de movimiento en el chorro aumentan con la presión de inyección, con lo que la dinámica del flujo es más rápida, lo que acorta la fase de estabilización y hace más rápida la evolución del chorro durante la fase de aceleración, como se aprecia en la *Figura 4.12*. No obstante, es de gran importancia resaltar que (S_r/S_i) durante la fase cuasi-estacionaria alcanza un valor similar para los tres niveles de

presión de inyección. Con ello se puede decir que durante esta fase final, la presión de inyección tiene el mismo efecto que el observable en un chorro inerte, excepto por el factor de proporcionalidad de las ecuaciones 1 y 2, indicando que k_r es independiente de la presión de inyección.

4.3.2.2. Temperatura del aire

Considerando como punto de partida las condiciones de operación **AT** comentadas en el apartado anterior, en la *Figura 4.13* se puede observar un retraso en el desarrollo de la combustión como consecuencia de disminución de la temperatura del aire, denotado por un mayor retraso del auto-encendido y que se aprecia por el retraso temporal del pico del ratio de penetraciones (S_r/S_i). En consecuencia, el proceso de auto-encendido ocurre en posiciones alejadas de la tobera de inyección, tal como indicaban los resultados de la longitud de lift-off obtenidos en la sección anterior. Ello acerca el dosado al lift-off de la llama cada vez a condiciones más estequiométricas ($\phi_{AT}=4.1 > \phi_{NO}= 3.2 > \phi_{BT}= 2.05$), resultando en una relación de expansión menor en el inicio de la combustión tanto radial (Θ_r/Θ_i) como axialmente (S_r/S_i).

En consonancia con el auto-encendido, el periodo de estabilización previo a la fase de aceleración es cada vez más largo como consecuencia de una temperatura de aire que decrece, y en el caso de menor temperatura **BT** se extiende incluso hasta el final de la inyección. En la fase de aceleración, la relación de las expansiones radial y axial evolucionan de manera similar para las condiciones de operación **AT** y **NO**, de alta y media temperatura. Sin embargo, se aprecia una disminución del ratio de penetraciones axial durante la fase cuasi-estacionaria al disminuir la temperatura del aire. En estas condiciones, tal diferencia no se puede asociar a diferencias en las tasas de mezcla en la base de llama, dado que la tendencia en dosado relativo en la base de la llama (ϕ_{LoL}) es similar a los descritos en el efecto de la presión de inyección ($\phi_{AT}=4.1 > \phi_{NO}= 3.2 > \phi_{BT}= 2.05$). Aun así, es latente la sensibilidad del ratio de penetraciones a la temperatura, a diferencia de la variación paramétrica de la presión de inyección. Por lo tanto, existe un efecto meramente térmico sobre la fase de penetración cuasi-estacionaria que puede asociarse a cambios en el proceso de englobamiento y que son el resultado de variación de la temperatura dentro del chorro como consecuencia del proceso de combustión [29]. Partiendo del análisis inicial para casos de chorros inertes y chorros reactivos en las ecuaciones 3 y 4, significa que k_r depende de la temperatura del aire y por lo ende, en la temperatura local de la llama.

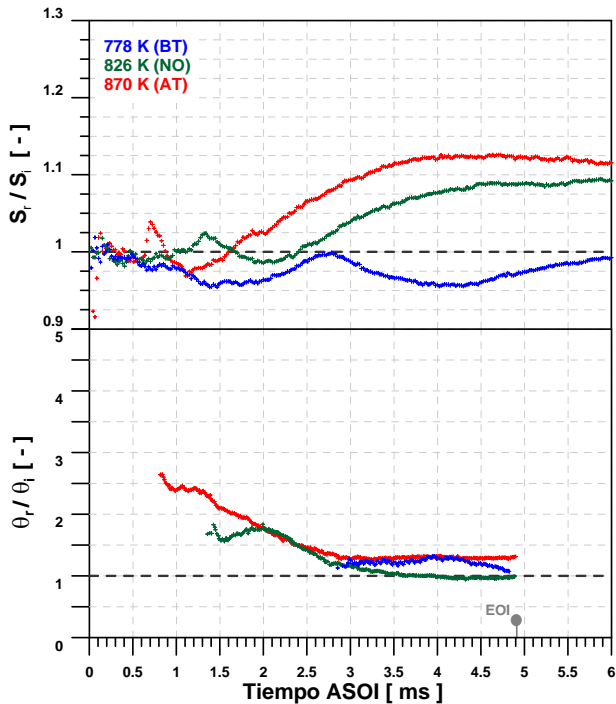


Figura 4.13.-Evolución temporal de los ratios de penetración y expansión radial en la variación paramétrica de temperatura del aire de la **Tabla 3.6** (Maqueta CPF). $P_{iny} = 50$ MPa; $\rho_{aire} = 21.2$ kg/m³; Tobera C.

Comparado a las otras dos condiciones de operación, el caso **BT** denota una apreciable disminución del ratio de penetraciones $S_r/S_i < 1$ en el intervalo de 1 a 1.25 ms después de SOI. Posteriormente, el pico inicial y la subsecuente etapa de aceleración ocurren de manera similar a los casos de mayor temperatura **NO-AT**. No obstante, esto ocurre con un retraso temporal y con una evolución del ratio de penetraciones menor debido a las bajas tasas de reactividad química propias de combustiones a menor temperatura ambiente.

4.3.2.3. Densidad del Aire

En la **Figura 4.14** se analiza el efecto de la variación paramétrica de la densidad del aire en las condiciones de operación **AD-NO-BD** de la **Tabla 3.6**. Al disminuir la densidad del aire se puede observar una tendencia hacia una evolución del proceso de combustión más lento como consecuencia de retraso cada vez mayor del auto-encendido de la mezcla. Ello ocurre como consecuencia de un empeoramiento del proceso de mezcla aire-combustible. También se aprecia que la

expansión radial durante el inicio de combustión se retrasa con disminución de la densidad del aire, aunque con un pico de expansión que se modifica significativamente. Ello parece indicar que el estado de la mezcla aire-combustible no varía sustancialmente al inicio del proceso de combustión, tal como lo indican los valores estimados de dosado relativo en la base de la llama o lift-off ($\phi_{AD}=3.5 > \phi_{NO}= 3.2 > \phi_{BD}=2.82$). Estos valores son poco sensibles a la variación de la densidad del aire en comparación al efecto inducido por la variación de la presión de inyección y de la temperatura.

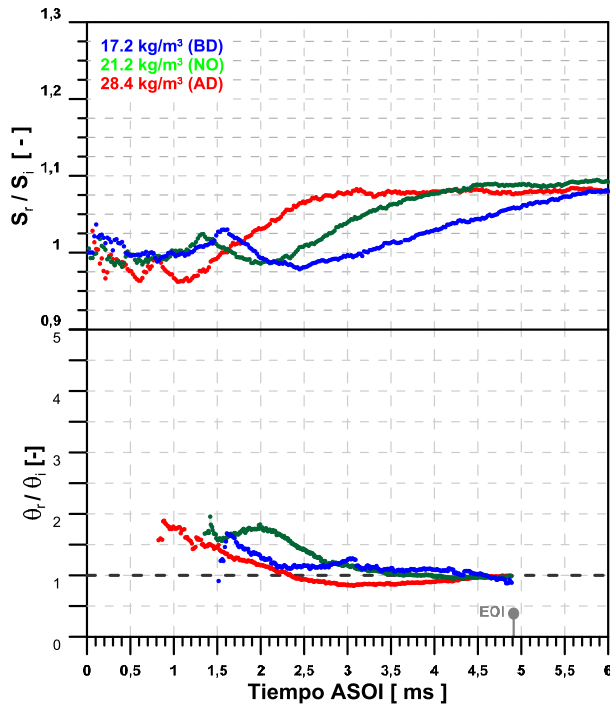


Figura 4.14.-Evolución temporal de los ratios de penetraciones y expansión radial en la variación paramétrica de la densidad del aire en la **Tabla 3.6**. $P_{iny}= 50$ MPa; $T_{aire}= 826$ K (Maqueta CPF); Tobera C.

Los resultados confirman que el periodo de estabilización previo la fase de aceleración es también más largo como consecuencia de disminución de la densidad del aire, probablemente relacionado con el hecho de que las tasas de mezcla son menores, con lo cual también se ralentiza la respuesta del chorro ante cambios debido a la combustión. Finalmente, mientras que la aceleración es menor al disminuir la densidad, es notable en la figura que para los tres casos, convergen en el mismo valor cuasi-estacionario. Ello parece indicar que durante

la fase final de penetración, la densidad del aire tiene exactamente el mismo efecto sobre la penetración de chorro indistintamente si es reactivo o no, exceptuando el factor de proporcionalidad. Considerando el análisis de la penetración chorros reactivos y no reactivos de las ecuaciones 4 y 5, significa que k_r es un valor independiente de la densidad ambiente.

4.3.2.4. Diámetro de tobera

Finalmente, el estudio resumido en la *Tabla 3.6*, incluía la misma matriz de condiciones de operación para toberas **B** y **C**. Todos los resultados anteriores analizados han utilizado la tobera de menor diámetro, Tobera C. En el otro caso, el mayor diámetro implica que las escalas espaciales del chorro aumentan. A pesar de la limitación impuesta para el análisis por el tamaño de la ventana de visualización, hay condiciones específicas **AT** y **AD** en donde es posible realizar una comparativa entre ambos casos. En este sentido la *Figura 4.15* muestra el efecto del diámetro de tobera para las condiciones de operación de alta temperatura **AT**.

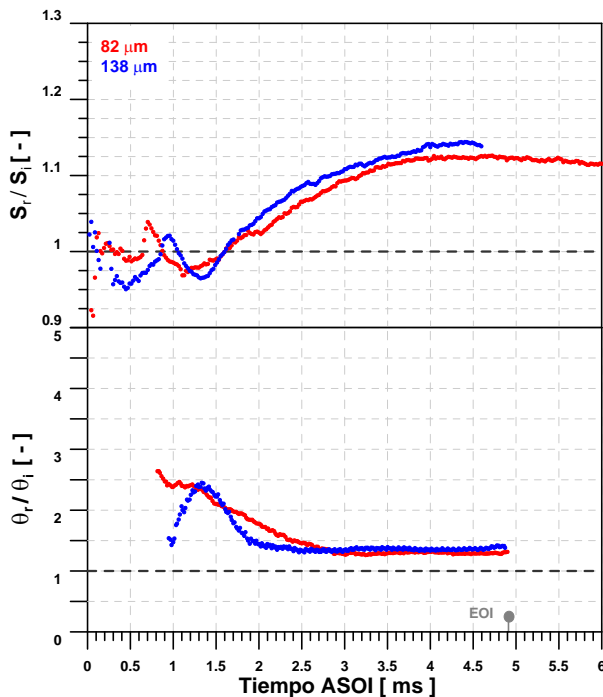


Figura 4.15.-Evolución temporal de los ratios de penetraciones y expansión radial en la variación paramétrica de diámetro de tobera (B-138 μm C-82 μm); $P_{\text{iny}} = 50 \text{ MPa}$; $T_{\text{aire}} = 870 \text{ K}$; $\rho_{\text{aire}} = 21.2 \text{ kg/m}^3$ (Maqueta CPF).

El autoencendido se ve retrasado aproximadamente $200 \mu\text{s}$ para la tobera de mayor diámetro debido a un proceso de mezcla más lento, que está asociado a las estimaciones del dosado relativo en la longitud del lift-off ($\phi_{138} = 6.8 > \phi_{82} = 4.1$). Sin embargo, en la tobera de mayor diámetro la tasa de penetración axial alcanza más rápido la fase de aceleración y converge en una penetración cuasi-estacionaria similar a la de la tobera de menor diámetro.

Obviamente existe una limitación por el tamaño de la ventana de visualización que afecta a las posibles observaciones de la tobera de mayor diámetro, lo cual no permite dar una conclusión definitiva sobre el papel del diámetro de tobera sobre el desarrollo de la penetración reactiva. Tal como sugiere la *Figura 4.16*, el efecto transitorio de la llama se reproduce para la Tobera B de acuerdo a las fases enumeradas previamente para la C. Sin embargo la limitación de la ventana imposibilita analizar el histórico de la evolución de la llama en su fase-cuasi estacionaria ya que la máxima longitud visible en la maqueta CPF no es suficiente para discernir el ratio de penetraciones especialmente en el nivel medio (100 MPa) y alto de presión de inyección (150 MPa). En cualquier caso, los motores de automoción actuales tienen unos tamaños de tobera más similares a la menor de las aquí analizados. Aun así, desde el punto de vista científico resulta de interés analizar aquello que el límite de ventana imposibilita. Puede que el modelado 3D de chorros contemplando los modelos apropiados de atomización, mezcla y autoencendido proporcionen elementos esclarecedores de los procesos de combustión y su relación con la fase cuasi-estacionaria de la penetración de llama.

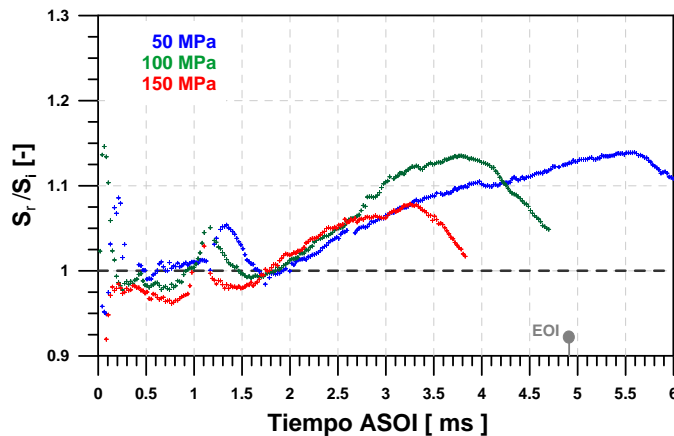


Figura 4.16.- Evolución temporal del ratio de penetraciones en condiciones AD (maqueta CPF) de la *Tabla 3.6*. $\rho_{\text{aire}} = 28.4 \text{ kg/m}^3$; $T_{\text{aire}} = 826 \text{ K}$, Tobera B.

4.4. Conclusiones

En consideración de las observaciones experimentales descritas en la sección 3.6, en este capítulo se han descrito el estudio paramétrico relativo a la medida de lift-off a partir de imágenes de schlieren y la descripción de la evolución transitoria de la penetración del chorro reactivo en la maqueta CPF.

En relación a la medida de lift-off a partir de la imagen de schlieren, resultan del estudio información de carácter experimental y de interpretación de la medida importante de mencionar:

- Se ha introducido por primera vez la medida del lift-off LoL_s como indicador de la ubicación de la base de llama Diesel.
- El análisis desde el punto de vista transitorio en condiciones de Spray-A, confirma que la medida de LoL_s es un parámetro indicador de combustión de alta temperatura. Mientras que en el caso de combustión de baja temperatura, referida en este estudio para $T_{aire} = 750K$ resulta en una medida de LoL_s mayor frente a medidas con resolución temporal como la luminosidad de amplio espectro. No obstante, para las demás temperaturas de aire investigadas, las medidas de LoL resultan esencialmente iguales entre ambas técnicas.
- El análisis desde el punto de vista cuasi-estacionario es consistente con las observaciones vertidas en análisis transitorio. En este caso, comparativamente a medidas de quimioluminiscencia del OH^* , tanto en condiciones de Spray-A (con n-Dodecano como combustible inyectados) como en condiciones de maqueta CPF (con n-Heptano como combustible inyectado), la medida de LoL_s obtenida es similar a la medida LoL_{OH} en condiciones por encima de 800K, siendo menor en condiciones de baja temperatura.
- Los mecanismos de estabilización del lift-off de llamas de inyección directa se ven contrastados en esta investigación atendiendo a relaciones empíricas, donde el LoL_s se escala acorde con la velocidad de inyección y la temperatura del aire:

$$LoL_s \propto U_0^{0.75} \cdot T_{aire}^{-5.43} (n - Dodecano)$$

$$LoL_s \propto U_0^{0.71} \cdot T_{aire}^{-5.04} (n - Heptano)$$

En relación a la evolución transitoria de la penetración de llama, la contribución principal se encuentra en dar respuesta al objetivo principal de esta tesis que se ha definido como es **la búsqueda de parámetros que gobiernan la evolución transitoria de llamas Diesel en condiciones típicas de combustión convencional**. En ese sentido, del estudio paramétrico emprendido a lo largo se puede resumir que:

- La evolución de llamas Diesel de inyección directa se describe de acuerdo a cinco fases: *Fase I*, característico del chorro inerte y donde ocurre el proceso de mezcla. *Fase II*, donde el autoencendido induce un aumento súbito del volumen del chorro tanto axial como radialmente. *Fase III*, donde la penetración del chorro se ralentiza y se asemeja a la penetración de un chorro inerte. *Fase IV*, donde la llama se acelera y la penetración reactiva aumenta más rápido que el caso inerte. *Fase V*, la penetración de llama alcanza una condición cuasi-estacionaria en la que la penetración reactiva crece en igual proporción que el caso del chorro inerte.
- A partir de los ratios de expansión axial (S_r/S_i) y radial (Θ_r/Θ_i) de la llama se ha establecido que la descripción de la fases en las que trascurren la llama ocurren en todas las condiciones evaluadas en estudio. Aunque, en condiciones menos reactivas (baja temperatura del aire) o donde la dinámica del chorro es muy acelerada (mayor diámetro de tobera o presión de inyección) la evidencia experimental resulta limitada a la escala óptica provista por la instalación (100 mm).
- Durante el autoencendido, los efectos de expansión no son tan importante en términos de crecimiento axial de la llama (máximo $S_r/S_i \sim 1.05$) como la dirección radial (máximo $\Theta_r/\Theta_i \sim 2.7$). Al ser esta una fase con una escala temporal muy corta, denota principalmente la expansión inicial de la mezcla que reacciona.
- En la fase de aceleración, las estimaciones a través del modelado 1-D del dosado de mezcla en la longitud de lift-off se han establecido como un elemento definitorio de la rapidez en la que ocurre el proceso. En condiciones de mezcla más rica (ϕ_{LOL}), el ratio de penetraciones S_r/S_i de la llama es mayor según las condiciones evaluadas en esta tesis. Es decir, S_r/S_i aumenta en condiciones en las que se minimiza la presión de inyección o se maximizan el diámetro de tobera y la temperatura/densidad del aire. Mientras que para todas

las condiciones evaluadas, la expansión radial de la llama Θ_r/Θ_i describe un progresiva disminución desde el máximo alcanzado en la fase del autoencendido hasta un valor $\Theta_r/\Theta_i \sim 1-1.3$, con un ángulo de chorro reactivo que bajo la definición adoptada en este trabajo se asemeja al ángulo de chorro inerte según se alcanza el final de la fase de aceleración.

- La fase de estabilización se intuye ocurre en todas las condiciones evaluadas. Sin embargo las restricciones del tamaño de las ventanas de visualización limitan su observación. Independiente de la condición evaluada, la estabilización se observa tanto en escalas axiales o radiales a través de S_r/S_i y Θ_r/Θ_i , respectivamente. No obstante, la condición de estabilización se alcanza según trascurren la evolución de las fases de penetración que le preceden. En ese sentido, reagrupando términos de las ecuaciones 4 y 5, la proporcionalidad experimental k_r/k_i **no** resuelve las diferencias en la tasa S_r/S_i observadas en el modelado 1-D como el de la *Figura 4.11*. Por ello, han de existir parámetros adicionales que justifiquen las diferencias observadas en la tasa de penetración cuasi-estacionaria. Si bien en este análisis se ha eliminado el efecto del ángulo de chorro reactivo, puede que éste sea un elemento de justificación tal que:

$$S_r / S_i = k_r / k_i \cdot f(\theta_r)$$

donde el ángulo de chorro reactivo, con información relativa al grado de expansión de la llama presumiblemente resuelva las diferencias experimentales y de modelado observado. Por ello, más investigación relativa a la evolución transitoria de la llama y en específico del volumen de la misma se hace necesaria.

4.5. Referencias

- [1]. Peters N., *Turbulent Combustion*, Cambridge University Press, 2000.
- [2]. Pickett L., Siebers D., Idicheria C., “Relationship between ignition processes and the lift-off length of diesel fuel jets”. *SAE Paper 2005-01-3843*, 2005.
- [3]. Siebers D., Higgins B., Pickett, L., “Flame lift-off on direct-injection diesel fuel jets: Oxygen concentration effects”. *SAE Paper 2002-01-0890*, 2002.

- [4]. Higgins B., Siebers D., “Measurement of the flame lift-off location on di diesel sprays using OH chemiluminescence”. *SAE Paper* 2001-01-0918, 2001.
- [5]. Siebers D., Higgins B., “Flame lift-off on direct-injection diesel sprays under quiescent conditions”. *SAE Paper* 2001-01-0530, 2001.
- [6]. Bardi M., “Partial needle lift and injection rate shape effect on the formation and combustion of the diesel spray”. *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2014.
- [7]. Desantes J. M., Pastor J. V., García-Oliver J. M., Pastor J. M., “A 1D model for the description of mixing-controlled reacting diesel sprays”. *Combustion and Flame*, Vol. 156(1), pp. 234–249, 2009.
- [8]. Siebers D., “Recent developments on diesel fuel jets under quiescent conditions”. *Flow and Combustion in Reciprocating Engines*, Springer, Capítulo 5, pp. 306-357, 2009.
- [9]. Pickett L., Kook S., Williams T., “Visualization of diesel spray penetration, cool-flame, ignition, high-temperature combustion, and soot formation using high-speed imaging”. *SAE Paper* 2009-01-0658, 2009.
- [10]. Meijer M., Malbec L. M., Bruneaux G., Somers L. M. T., “Engine Combustion Network: Spray A basic measurements advanced diagnostics”. *ICLASS*, 2012.
- [11]. Engine Combustion Network (ECN),
<http://www.sandia.gov/ecn/cvdata/targetCondition/sprayA.php>.
- [12]. Engine Combustion Network (ECN),
<http://www.cmt.upv.es/ECN.aspx>.
- [13]. Bardi M., Payri R., Marie L. M., Bruneaux G. et al., “Engine Combustion Network: Comparison of spray development, vaporization, and combustion in different combustion vessels”. *Atomization and Sprays*, pp. 807-842, 2012.
- [14]. Meijer M., Somers B., Johnson J., Naber J., et al., “Engine Combustion Network (ECN): Characterization and comparison of boundary conditions for different combustion vessels”. *Atomization and Sprays*. Vol. 22(9), pp. 777-806, 2012.
- [15]. Pickett L., Siebers D., Idicheria C., “Relationship between ignition processes and the lift-off length of diesel fuel jets”. *SAE Paper* 2005-01-3843, 2005.
- [16]. Benajes J., Payri R., Bardi M., Martí-Aldaraví P., “Experimental characterization of diesel ignition and lift-off length using a single-hole ECN injector”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 58(1-2), pp.554-563, 2013.

- [17].Pickett L., Manin J., Genzale C., Siebers, D. et al.,“Relationship between diesel fuel spray vapor penetration/dispersion and local fuel mixture fraction”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 4(1), pp.764-799, 2011.
- [18].Payri F., Pastor J., Nerva J., and Garcia-Oliver J., “Lift-off length and KL extinction measurements of biodiesel and fischer-tropsch fuels under quasi-steady diesel engine conditions”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 4(2), pp.2278-2297,2011.
- [19].Pickett L., Kook S., Peerson H, Andersson Ö, “Diesel fuel jet lift-off stabilization in the presence of laser-induced plasma ignition”, *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 32(2), pp. 2793-2800, 2009.
- [20].Manin J., Kastengren A., Payri R., “Understanding the acoustic oscillations observed in the injection rate of a common-rail direct injection diesel injector”. *J. Eng. Gas Turbines Power*, Vol. 134 (12), pp. 122–132 2012.
- [21].Musculus M. Kattke K., “Entrainment waves in diesel jets”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 2 (1), p.p. 1170–1193, 2009.
- [22].Pastor J. V., Payri R., García-Oliver J., Briceño F.J., “Schlieren methodology for the analysis of transient diesel flame evolution”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 6, p.p. 1661-1676, 2013.
- [23].Pastor J., Payri R., Garcia-Oliver J., Nerva, J., “Schlieren measurements of the ECN-Spray A penetration under inert and reacting Conditions”. *SAE Paper 2012-01-0456*, 2012.
- [24].Pastor J. V., López J. J., García J. M., Pastor J. M. “A 1D model for the description of mixing-controlled inert diesel sprays”. *Fuel*, Vol. 87(13-14), pp. 2871-2885, 2008.
- [25].Bermúdez V., García J., Juliá E., Martínez S., “Engine with optically accessible cylinder head: a research tool for injection and combustion processes”. *SAE Paper 2003-01-1110*, 2003.
- [26].Kobayashi H., Kamimoto T., Matsuoka S., “A photographic and thermodynamic study of diesel combustion in a rapid compression machine”. *SAE Paper 810259*, 1981.
- [27].Pickett L.,Siebers D., “Soot in diesel fuel jets: effects of ambient temperature,ambient density, and injection pressure”. *Combustion and Flame*, Vol. 138, pp.114–135, 2004.
- [28].Cenker E., Bruneaux G., Pickett L. M., Schulz C., “Study of soot formation and oxidation in the Engine Combustion Network (ECN), spray A: Effects of ambient temperature and oxygen concentration”. *SAE Int. J. Eng.* 6, Vol. 1, pp. 352–365,2013.

-
- [29]. Han D., Mungal M.G., "Direct measurement of entrainment in reacting/non-reacting turbulent jets". *Combustion and Flame*, Vol. 124(3), pp. 370–386, 2001

Capítulo 5

Metodología de termometría de dos colores para cuantificación de hollín

Contenido

5.1. Introducción	147
5.2. Metodología de termometría de dos colores	147
5.2.1. Material óptico y experimentación	151
5.2.2. Procesado de imágenes	155
5.2.3. Metodologías de análisis	158
5.3. Análisis comparativo del autoencendido y lift-off en combustibles Diesel y n-Heptano	163
5.4. Formación de hollín en llamas Diesel y n-Heptano en base a variaciones paramétricas	166
5.4.1. Presión de inyección	168
5.4.2. Densidad del aire	169
5.4.3. Temperatura del aire	170
5.4.4. Diámetro de tobera	171
5.5. Discusión	173
5.6. Conclusiones	176
5.7. Anexo	179
5.8. Referencias	180

5.1. Introducción

La aplicabilidad real de la termometría de dos colores para cuantificar la cantidad de hollín y su temperatura en una llama es un tema abierto de investigación, de ahí que se trate en detalle en esta tesis. En principio, puede resultar poco ortodoxo presentar metodologías experimentales en un capítulo de discusión de los resultados de la investigación. Sin embargo, la implementación realizada de la técnica para estudio de llamas Diesel se considera como una contribución relevante del presente trabajo.

En primera instancia, afrontando las bases teóricas de la medida de termometría se da cuenta de los límites físicos de la medida. Partiendo de trabajos anteriores del instituto CMT-Motores Térmicos, se da solución y se plantea una experimentación basada en montajes ópticos, procesado digital de imágenes y elementos de análisis los cuales, posteriormente serán empleados en la investigación de formación de hollín en dos combustibles. El primero es un combustible Diesel convencional, el segundo n-Heptano, que tiene similares características de autoencendido pero tiene una composición química conocida, y además forma significativamente menos hollín. Además, partiendo de una variación paramétrica se da cuenta de la relación entre el autoencendido y la formación de hollín de ambos combustibles. Para finalmente en la sección de discusión, abordar la extensibilidad de la técnica e incluso las limitaciones a las que puede verse según sea la condición de inyección evaluada.

5.2. Metodología de termometría de dos colores

Un ejemplo más de la aplicación de técnicas de visualización en el diagnóstico de combustión es el método de termometría de 2 colores. Esta metodología busca deducir mediante análisis del espectro natural de emisión, la fracción volumétrica del hollín y la temperatura del hollín [1,2]. Y aunque específicamente la radiación proviene de partículas de hollín, las estimaciones realizadas indican que la temperatura de la fase gaseosa que las rodea tiene respecto de ellas una diferencia menor de 1°C [3]. Lo cual es el valor añadido y de carácter único de esta técnica, ya que proporciona estimaciones de dicha temperatura, parámetro importante para el desarrollo de la combustión Diesel y la comprensión de la formación de productos de combustión [4].

El punto de partida del método es la suposición de que la radiación ocurre desde una distribución uniforme de partículas de hollín a lo largo del camino óptico

con el que se observa una llama Diesel. De tal manera, la radiación depende la longitud de onda, así como de la temperatura y la cantidad de hollín uniformemente distribuido a lo largo de la llama. Lo cual matemáticamente se traduce en:

$$I_{hollin}(\lambda, T, fv, L) = \varepsilon(\lambda, fv, L) \cdot I_b(\lambda, T) \quad (1)$$

donde la radiación del hollín I_{hollin} es proporcional a la radiación emitida por un cuerpo negro I_b a una temperatura y longitud de onda λ multiplicada por la emisividad ε , que depende de la longitud de onda y la cantidad de hollín. Este último parámetro viene definido por el producto de la fracción volumétrica de hollín fv y el camino óptico a través de la llama L .

A partir de la ecuación de Planck, la radiación de un cuerpo negro I_b , se puede escribir como:

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

Donde c_1 y c_2 son constantes, $c_1 = 1.1919439 \cdot 10^{-16} \text{ W}\cdot\text{m}^2\cdot\text{sr}^{-1}$ y $c_2 = 1.4388 \cdot 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$. Mientras que la dependencia de ε con la cantidad de hollín habitualmente se expresa a partir de la ley de Bouguer-Lambert-Beer despreciando el efecto del scattering:

$$\varepsilon(k_\lambda, L) = 1 - \exp\left(-\frac{K_{ext} \cdot fv \cdot L}{\lambda}\right) \quad (3)$$

donde K_{ext} es una variable adimensional del coeficiente de extinción de la llama. Partiendo de asunciones empíricas tal como en [5], se establece que:

$$\frac{k_{ext} \cdot fv \cdot L}{\lambda} = \frac{KL_{2C}}{\lambda^\alpha} \quad (4)$$

[5] donde λ en la parte derecha de la ecuación queda usualmente expresada en micrómetros y α es una constante que varía de acuerdo a diferentes autores.

Empíricamente se ha determinado en [5] que la definición de α no varía más de un 2% a la previamente definida por Matsui en [3] con $\alpha = 1.39$. En otros casos, α es expresado como función de la longitud de onda λ [6]. Aunque es la definición de $\alpha = 1.39$ la adoptada para este estudio.

Si bien el proceso de emisión es bastante preciso desde el punto de vista de la definición matemática, el cómputo es bastante sensible a la definición del camino óptico de la llama L , dada la dificultad de obtener medidas precisas en llamas donde está inmerso el proceso de absorción y la coincidencia geométrica de la radiación de la llama en longitudes de onda diferentes. Lo anterior, en conjunto con la dificultad experimental de establecer L a través de medidas como las desarrolladas en [7] es lo que ha llevado diversos autores [1,3,6,8] a definir la dependencia de la emisividad en función de la cantidad de hollín presente a lo largo del camino óptico $KL = K_{hollin} \cdot L$. Lo que finalmente permite expresar la radiancia de una partícula de hollín como un factor exclusivamente dependiente de la temperatura, y la cantidad de hollín captada a una longitud de onda definida, tal que:

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

La simplicidad de la aplicación de esta técnica, radica en la solución de la ecuación anterior mediante la medición de la radiancia emitida por una llama en dos longitudes de onda diferentes I_1 y I_2 , lo cual permite establecer y resolver un sistema de dos ecuaciones simple, donde la temperatura T_{2C} y el KL_{2C} del hollín son determinados. Sin embargo, la robustez del resultado de tales medidas es otra empresa, donde intervienen la puesta a punto del sistema óptico, pasando por la solución analítica y por último, no menos importante es el tratamiento de los resultados, como se verá posteriormente.

Si bien el planteamiento del método es sencillo (obtener T_{2C} y KL_{2C} a partir de dos valores I_1 e I_2 de la radiancia a diferentes longitudes de onda), la resolución matemática a partir de señales experimentales presenta una serie de peculiaridades que conviene analizar, tal como indica Nerva en [9]. Para ello es útil la representación gráfica de la **Figura 5.1**, que muestra el espectro de soluciones a la metodología tomando como entrada las radiancias espectrales (I_1 , I_2). En función de estas entradas se pueden obtener diferentes zonas de solución para T_{2C} y KL_{2C} :

- EZ=2, es la definida zona de error donde el balance de radiancia medida entre los dos canales resultan una radiación no física, pues resultaría una emisividad mayor a la unidad, esto es, en uno de los dos canales la radiancia es mayor a la que puede emitir un cuerpo negro [10]
- EZ=3, es la zona de error donde el balance de radiancia para el espectro de concentraciones de hollín ($0.01 \leq KL_{2C} \leq 3$) resulta en temperatura de hollín mayores a 3000 K, que es mucho más alta que la temperatura estequiométrica de llamas Diesel máxima alcanzable a lo largo de este estudio.

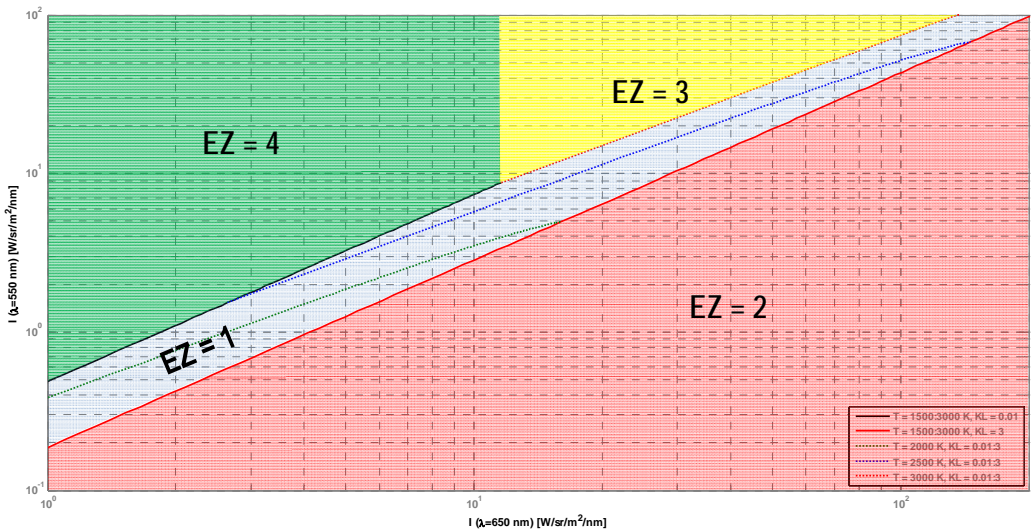


Figura 5.1.- Solución analítica al modelo de radiancia de la ecuación 5 y distribución de zonas de error.

- EZ=4, es la zona de error donde el balance de radiancia, resulta en una cantidad de hollín muy baja (KL_{2C} inferior a 0.01). Lo cual está asociado a efectos como el ruido de lectura y/o de captura de sensores de cámaras [11] como las usadas en este estudio.
- EZ=1 es la zona de “error” donde el balance de radiancia resulta en una distribución de hollín y temperaturas considerados como válidos para distribuciones de hollín que varíen entre $0.01 \leq KL_{2C} \leq 3$.

Si bien sobre razonamientos teóricos solamente deberíamos obtener puntos sobre la zona $EZ=1$, en la práctica veremos más adelante que es frecuente obtener puntos en el resto de las zonas.

5.2.1. Material óptico y experimentación

Payri et al. en su estudio [10], han detallado las fuentes de error mayormente asociadas a medidas a través del método de dos colores basados en sistemas de adquisición de imágenes, para lo cual se ha considerado:

- La selección de las longitudes de onda para determinar la radiancia de llamas de hollín se han ubicado en el espectro visible 550 nm y 650 nm en aras de explotar la mayor sensibilidad de la radiación proveniente de llamas Diesel a, la temperatura y la diferencia de la longitud de onda de los dos canales [1]
- La selección y puesta a punto del sistema óptico, es en gran medida el factor que determina la validez o el fracaso de los resultados. Si bien contrasta con la simplicidad de la técnica, es el factor de mayor peso en la solución analítica desarrollada a partir de la ecuación 5. ¿Por qué? ¿Cómo es que el sistema de adquisición da validez a un sistema matemáticamente descrito? Son preguntas que pueden surgir al lector y tienen su respuesta en la muy específica y restringida zona de validez del método ($EZ=1$).

Tal como se ve en la *Figura 5.2*, la disposición óptica por sí misma puede tener consecuencia en el resultado final. Así, una disposición “estereoscópica”, es decir, una cámara acoplada a un duplicador de imagen (ver *Figura 5.2* arriba-izquierda) tal como se ha usado en numerosos estudios [8-12], es altamente probable a sufrir efectos de viñeteado (pérdidas incontroladas en elementos ópticos del sistema) y por lo tanto, la radiancia registrada es sesgada de manera incontrolada en el receptor. Este efecto se aprecia en la no uniformidad de la intensidad percibida en los extremos derechos de la imagen estereoscópica de la luz emitida por una esfera integradora (ver *Figura 5.2* centro-izquierda), de la cual se espera una distribución muy uniforme de la luz.

Incluso, la solución final también está afectada por el hecho de que los recorridos ópticos de cada uno de los canales de radiancia es

distinto, y por lo tanto el tamaño del objeto (en este caso, la esfera integradora) es un 25% menor en la imagen I_{m-2} , por lo que resulta imperante reconstruir y disminuir el tamaño de la imagen I_{m-1} añadiendo “píxeles sintéticos” con información espacial promedio de la imagen original del canal en áreas definidas que puede resultar no satisfactorio tal como se observa en el resultado final (véase *Figura 5.2* abajo-izquierda).

La solución adoptada para este estudio, el uso de dos cámaras en conjunto con un elemento duplicador (beam splitter) en la *Figura 5.2* (arriba-derecha) elimina las incertidumbres del tamaño del objeto emisor, ya que al garantizar la misma distancia entre el objeto y las cámaras, permite evaluar punto a punto (pixel a pixel) los niveles de radiancia y ha permitido obtener resultados como los de la *Figura 5.2* (bajo-derecha). Estos resultados son ostensiblemente más válidos dentro de la definición de la zona de errores planteada para el modelo de radiancia de la ecuación 5.

En el desarrollo de los ensayos que conforman este estudio se ha hecho uso del motor óptico descrito en el apartado 3.4.1. Tal como se muestra en la *Figura 5.2*, se han dispuesto de dos cámaras para captar la radiancia emitida por la llama. Una es una cámara de alta velocidad Phantom V710 (capaz de registrar hasta 1,000,000 imágenes por segundo, con resolución reducida). Mientras que la segunda es una cámara Sensicam de baja velocidad de adquisición, que permite capturar solamente una imagen por cada ciclo de combustión. De esta manera, por cada ciclo de inyección solamente se dispone de un único instante donde la radiación de llama es factible de aplicar para el método de los dos colores. Si bien sus capacidades en cuanto a velocidades de adquisición son muy distintas, la sensibilidad de ambas cámaras es de 12 bits y 4095 escalas de grises, lo cual favorece (i) registrar emisión de zonas de radiancia muy débil cerca del lift-off de la llama y, (ii) mantener una resolución espacial de la llama muy superior a la que se usan con elementos estereoscópicos duplicadores.

En la configuración óptica de la *Figura 5.2* (arriba-derecha), el elemento duplicador (beam splitter) con una transmitancia del 50% se ha dispuesto a la distancia mínima posible respecto de la cámara de combustión (~ 50 cm) que permitiese el acceso para la limpieza de sus accesos ópticos. La cámara de alta velocidad se ha dispuesto en la visión frontal a la cámara de combustión (~ 40 cm desde el elemento duplicador, equipada con una lente $f/1.8$ de focal fija de 100 mm y un filtro interferencial para registrar la radiancia de la longitud de onda de $I_1=550$ nm (ancho de banda de 10 nm). Por su parte, la cámara de baja velocidad, se ha

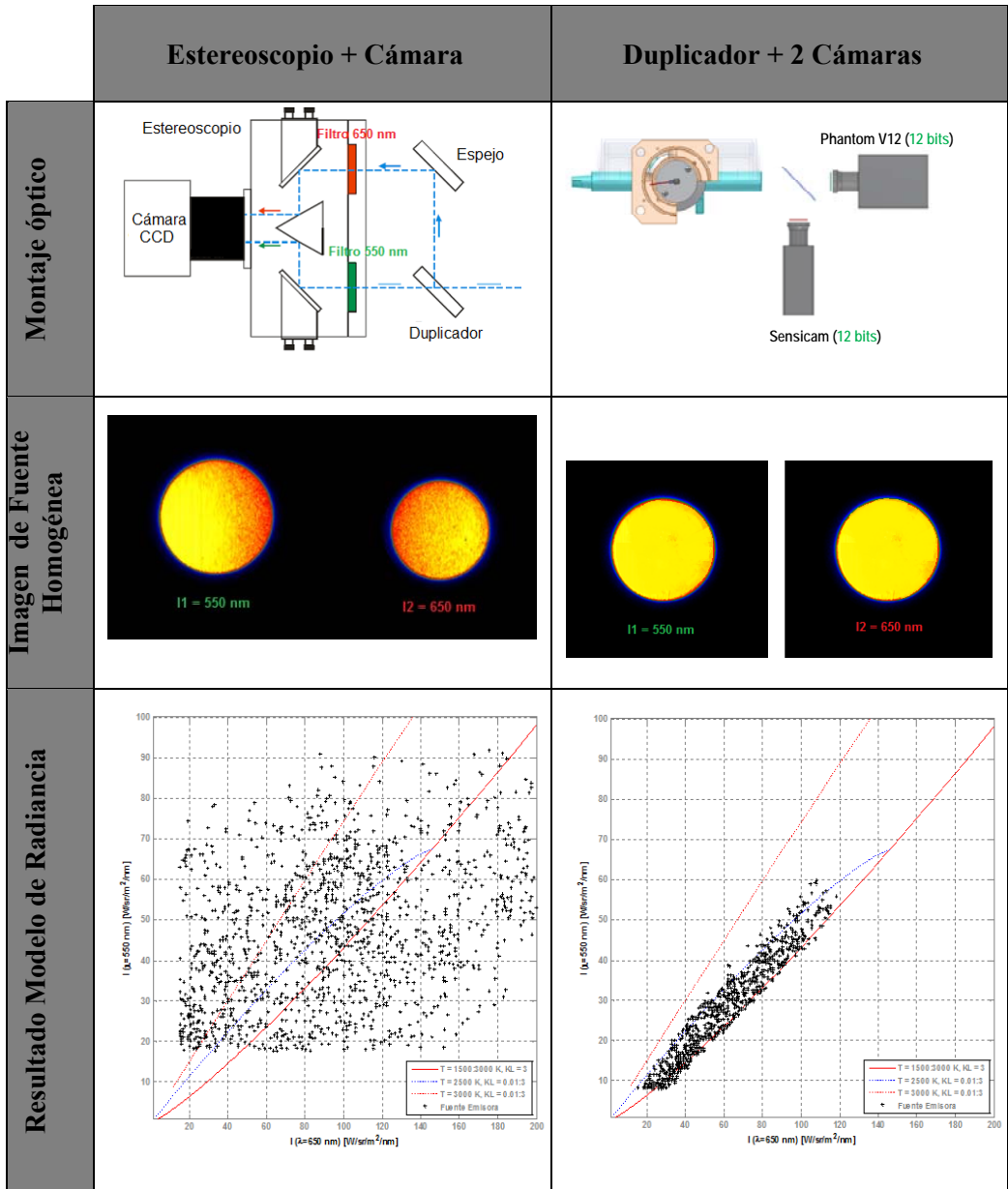


Figura 5.2.- Impacto de configuraciones ópticas sobre el desarrollo y estimación del modelo de radiancia de la termometría de dos colores. Arriba: Arreglos ópticos. Medio: Radiancia capturadas a partir de una esfera integrada (radiador difuso ideal). Bajo: Disposición del espacio de soluciones del método.

dispuesto en el lateral, de manera perpendicular al acceso óptico tal como se muestra en la *Figura 5.2*. En este caso, la cámara se ha dispuesto con una lente de $f/2.8-12$ en conjunto con un filtro interferencial para registrar la radiancia de $I_2=650$ nm (igual ancho de banda que I_1 , 10 nm). La frecuencia de adquisición máxima alcanzada en la cámara de alta velocidad con la resolución de 336×996 píxeles, es de 19000 fps (imágenes por segundo) y un tiempo de exposición que varía según lo mostrado en el anexo (sección 5.7), que es el usado en ambas cámaras.

En la configuración óptica de la *Figura 5.2* (arriba-derecha), el elemento duplicador (beam splitter) con una transmitancia del 50% se ha dispuesto a la distancia mínima posible respecto de la cámara combustión (~ 50 cm) que permitiese el acceso para la limpieza de sus accesos ópticos. La cámara de alta velocidad se ha dispuesto en la visión frontal a la cámara de combustión (~ 40 cm desde el elemento duplicador, equipada con una lente $f/1.8$ de focal fija de 100 mm y un filtro interferencial para registrar la radiancia de la longitud de onda de $I_1=550$ nm (ancho de banda de 10 nm). Por su parte, la cámara de baja velocidad, se ha dispuesto en el lateral, de manera perpendicular al acceso óptico tal como se muestra en la *Figura 5.2*. En este caso, la cámara se ha dispuesto con una lente de $f/2.8-12$ en conjunto con un filtro interferencial para registrar la radiancia de $I_2=650$ nm (igual ancho de banda que I_1 , 10 nm) con un resolución espacial de la llama de 0.123 mm-píxel y un tiempo de exposición que varía según lo mostrado en el anexo (sección 5.7), que es el usado en ambas cámaras.

La *Figura 3.6*, muestra la configuración de sincronización, tanto de inyección y adquisición de imágenes, durante el ciclo de compresión del motor óptico. En conjunto con la energización del inyector, se registra la radiancia $I_{m,550}$ con la frecuencia antes mencionada. Después de 4.4 ms ASOE (4.75° después del punto muerto superior), se abre el obturador de la segunda cámara $I_{m,650}$, coincidiendo temporalmente la apertura de ambos obturadores. Desde el punto de vista de condiciones de motor, la selección del instante de medición de radiancia no es ni subjetivo y/o arbitrario. Por lo contrario, atiende al hecho de que la fase de combustión por difusión está plenamente instaurada y los efectos transitorios tanto, de la combustión pre-mezclada [13-15] como los de final de inyección [16,17] no interfieran. El estudio paramétrico se ha realizado sobre las condiciones de operación del motor óptico de la *Tabla 3.6*, parámetros de inyección de la *Tabla 3.3* y las Toberas B y C (véase *Tabla 3.2*). Un total de 60 variaciones forman parte de este estudio de las cuales se han registrado 15 inyecciones por ensayo, para un total de 900 mediciones.

5.2.2. Procesado de imágenes

Segmentación de las imágenes de llama:

Cuanto se refiere al tratamiento y procesado de imágenes, dentro del estudio de llamas Diesel, es de común práctica distinguir y/o separar información real de la llama de aquello considerado ruido tanto de nivel de fondo o de lectura propio de sensores de cámaras digitales. En el caso de la termometría de dos colores, toma mayor importancia dado al impacto en cuanto la estimación del modelo de radiancia o en su defecto, la mala interpretación de los parámetros de análisis, T_{2C} y KL_{2C} , como consecuencia de valores no físicos derivados del cálculo matemático. Al igual que en muchos estudios [18-20], la imágenes obtenidas se han segmentado según el criterio de un tanto por ciento del máxima intensidad registrada sobre cada imagen [21], con el fin de abarcar el espectro que va desde llamas de baja intensidad hasta el máximo (sin saturación) registrable. En la *Figura 5.3*, se muestra el proceso para distintos niveles de segmentación, del cual define y representa lo que de manera subjetiva el observador puede definir como el núcleo de la llama. En la figura, se refiere el proceso de segmentación sobre la imagen de $I_{m,650}$ ya que la cámara por sus características constructivas tiene un sensor con ND de fondo mayor respecto a la $I_{m,550}$. Por ende, es más susceptible a contener pixeles de carácter incierto en cuanto a su pertenencia a la llama. *En el análisis, se ha determinado que la segmentación adecuada ocurre cuando el umbral está situado en el 10% de la intensidad máxima de la llama.*

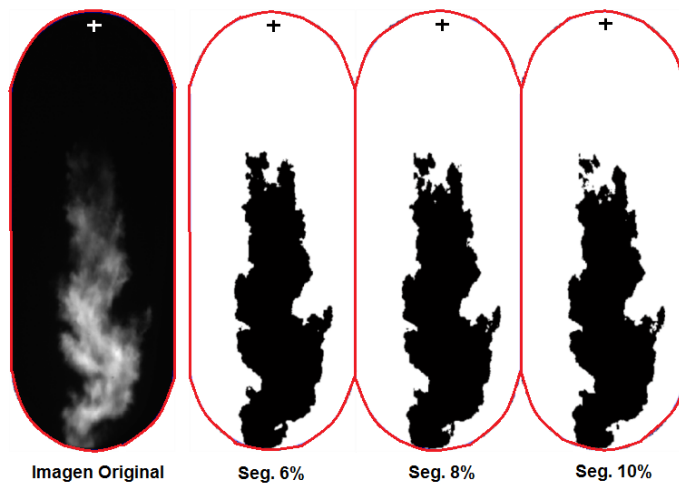


Figura 5.3.- Imagen original de radiancia de $I_m = 650$ nm en conjunto con distintos umbrales de segmentación, 10% es el seleccionado para el procesados de las imágenes del estudio.

Calibración espacial:

Se entiende por calibración espacial al proceso de superposición de las dos imágenes registradas por las dos cámaras del método de los dos colores. Tanto en cuanto la calibración espacial de la llama Diesel sea robusta, el resultado final de la termometría de dos colores se puede asociar a resultados como los mostrados en la **Figura 5.2** (abajo-derecha), ya que no hay que olvidar que la solución del modelo de radiancia es una solución punto a punto (pixel a pixel) de la llama. Tal importancia en la correspondencia espacial ha sido considerada en la puesta a punto del sistema.

Como primer paso durante el montaje se ha dispuesto un diodo láser, en la vecindad del eje definido por la punta del inyector dentro de la cámara de combustión. El objetivo era garantizar que el camino óptico recorrido por el haz de luz una vez se reflejase en espejos dispuestos sobre las lentes acopladas a las cámaras fuese el mismo; de esta manera y de forma previa se corregían las inclinaciones que respecto al punto de vista de la llama pudiesen tener ambas cámaras. Posteriormente, se ha variado la focal de la lente de la cámara destinada a registrar la radiancia $I_{m,650}$ hasta alcanzar una relación mm-pixel de 0.123 igual a la obtenida con el objetivo de focal fija de la cámara que registra $I_{m,550}$ y así garantizar la correspondencia pixel a pixel que se ha puntualizado a lo largo de párrafos anteriores.

No obstante el proceso de calibración espacial tiene un paso adicional de carácter digital. En este caso, haciendo uso del código MATLAB (función *cp2tform*) se hace una reconstrucción en la que tomando como base una de las imágenes, la segunda imagen se traslada y gira para hacer corresponder puntos previamente seleccionados en ambas imágenes. Para ello, se han obtenido imágenes de un patrón de intersecciones definidas y de fácil localización para facilitar la correspondencia, de la cual se ha evaluado una corrección a aplicar consistente en un desplazamiento horizontal y vertical de 1 pixel en dirección sureste con una rotación de 1.35° respecto de la horizontal. Esta corrección puede resultar a priori poco significativa, aunque en definitiva hace más preciso un procedimiento hasta ahora descrito, como meramente subjetivo. Posteriormente, al igual que en [9] se ha aplica un proceso de cálculo exhaustivo usando el código MATLAB (función *xcorr2*) para determinar la mejor correspondencia entre las imágenes $I_{m,550}$ y $I_{m,650}$; consultar el estudio [22] para obtener más detalles sobre este proceso.

La **Figura 5.4**, resume las consideraciones de procesado y calibraciones descritas previamente, de manera deliberada se han superpuesto erróneamente las imágenes ($I_{m,550}$ en rojo y $I_{m,650}$ en verde, de manera que la superposición correcta presentará un color sustancialmente amarillo), para hacer notar al lector cómo

puede ser el punto de partida antes de alcanzar el punto óptimo en cuanto procesado digital de la imagen. Si bien en la *Figura 5.2* se atribuye una solución errónea del modelo de radiancia producto del arreglo óptico, la *Figura 5.6* (superposición) viene a constatar que el tratamiento digital por sí solo puede llevar a la misma interpretación de la solución final. Mientras que la traslación y rotación mostradas en la figura, mejoran la relación entre píxeles y por ende, en la solución final del modelo de radiancia ejemplificado en la *Figura 5.2* (derecha-bajo)

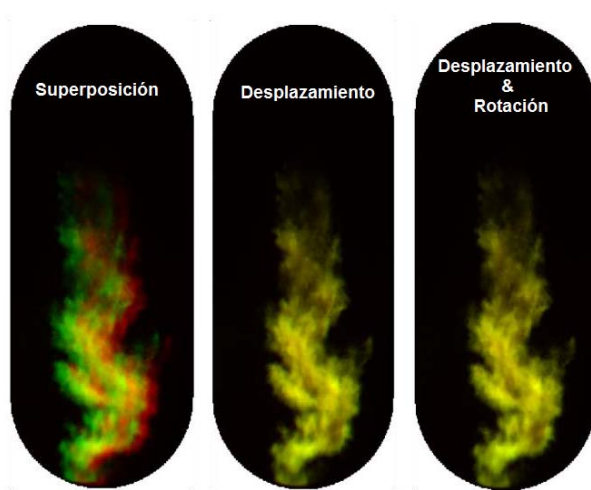


Figura 5.4.- Tratamiento digital de imágenes de radiancia I_{m-550} e I_{m-650} . Superposición, desplazamiento y rotación.

Calibración de radiancia:

Desde el punto de vista óptico, la imagen obtenida de la llama se representa en nivel digital (ND) de la imagen resultado. Por lo tanto, es necesario definir una correspondencia entre ND y una radiancia en particular, permitiendo dar solución al modelo de radiancia de la ecuación 5. Las soluciones en este caso pueden variar según el estudio consultado, Matsui [3] usó un cuerpo negro como sistema de calibración, por su parte Singh [6] ha utilizado una fuente de luz acoplada a una esfera integradora. Lo adecuado del uso de este tipo de fuentes no es el motivo de estudio sin embargo puede resultar fundamental. En el caso de este estudio, se ha usado una lámpara de filamento de tungsteno que se energiza de tal manera de obtener una radiación continua en un espectro de temperaturas de color entre 2000 K y 2700 K, a lo largo de un espectro de radiancia entre 370 nm y 770 nm tal como se ha hecho en [8]. Es importante que en este proceso se reproduzca la condición de ensayo original. Ubicando el filamento de la lámpara a la misma distancia que separa la llama respecto de las cámaras, se han de colocar las ventanas, elementos

duplicadores, filtros, etc., garantizado un ángulo sólido de colección igual al obtenido durante el desarrollo de la campaña de ensayos. Conjuntamente con los ajustes de cámaras (relación mm-píxel, velocidad y tiempo de adquisición), se registran los ND correspondientes a una radiancia dada. Considerando que el anexo (sección 5.7) resume todas las configuraciones usadas en estos experimentos, la *Figura 5.5* ejemplifica el resultado del proceso de calibración considerando bajo las mismas condiciones de adquisición descritas en el párrafo de inicio de la sección 5.2.2 y su comparación con el ajuste de mínimos cuadrados empleado en el procesado digital de las imágenes.

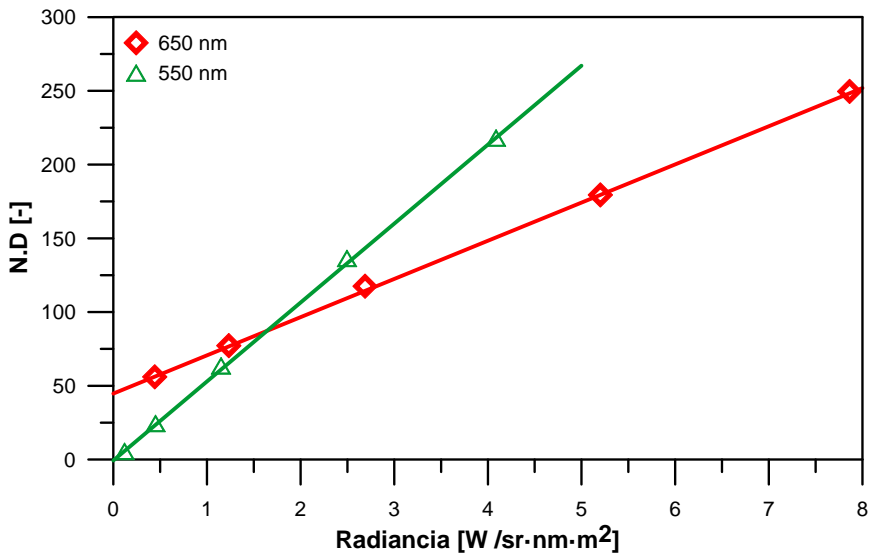


Figura 5.5.- Ejemplo de calibración del nivel digital captado con el sistema óptico empleado en el estudio.

5.2.3. Metodologías de análisis

Imagen de zona activa de llama:

Retomando las imágenes de schlieren en la *Figura 3.17* y la discusión de la influencia del movimiento del aire en la penetración del chorro, es apreciable la alta influencia que tiene sobre el desarrollo de la llama el movimiento del pistón. Si bien es tangible sobre las medidas de la penetración de la llama, no escapa al hecho del desarrollo del proceso de combustión, ya que tales gradientes de velocidad afectan el proceso de mezcla y re-englobamiento de la llama en diversos estudios

realizados en la misma instalación [18,19,23] e incluso en estudios más fundamentales sobre la dinámica de gases y re-englobamiento de aire en chorros Diesel [7,24]. Tanto la disminución de la cantidad de movimiento producto de una menor presión de inyección y/o menor diámetro de tobera, así como también la modificación de la dinámica de gases en la cámara de combustión (aumento de densidad o temperatura del aire) favorecen al desarrollo de “paquetes” de llamas que se desacoplan de la estructura principal de la llama.

Bajo tales observaciones, resulta cuestionable la ponderación de estos efectos de carácter turbulento sobre la imagen global de la temperatura y el hollín resultante del análisis de llamas Diesel. Para ello, se ha definido la “zona activa de la llama” (PAI) tal como se ejemplifica en la *Figura 5.5*. La imagen PAI está definida bajo el estadístico de probabilidad de que un pixel esté activo desde el punto de vista de emisión de radiancia. Téngase en cuenta que de cada ensayo hay una población de 15 imágenes que, una vez segmentadas según se ha explicado anteriormente, nos dan una información binaria para cada pixel, esto es, si este está activo o no. A partir de esta población de imágenes binarias, se ha podido calcular una imagen de probabilidad punto a punto de la llama. A continuación, se ha definido un umbral de probabilidad del 71%, de tal manera que solamente se considerarán para el análisis de radiancia los píxeles con una probabilidad superior a este valor. Aplicando la máscara resultante a la media de las 15 imágenes de radiación de cada ciclo, se obtiene lo que se ha llamado zona activa de la llama (PAI), tal como se esquematiza en la *Figura 5.6*.

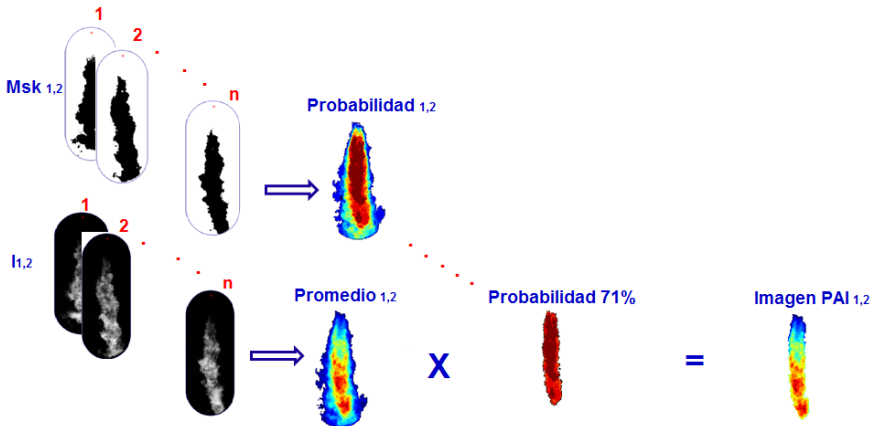


Figura 5.6.- Definición de la imagen PAI.

La imagen PAI de cada longitud de onda será la que se emplee como entrada para obtener la temperatura y KL_{2C} a partir del algoritmo de solución de dos colores. En secciones posteriores se compararán los resultados de aplicación de la imagen PAI con otro planteamiento, también frecuente en la literatura, en el que cada imagen grabada se segmenta y directamente se le aplica el algoritmo de dos colores, de manera que el proceso de promediado se realiza sobre los mapas de temperatura y KL_{2C} obtenidos, y no sobre la radiación.

La imagen PAI se ha llevado dentro del cálculo del modelo de radiancia y en lo sucesivo se analizará paralelamente al enfoque de variabilidad de la muestra dentro de cada variación paramétrica. En contraparte a los posibles efectos de no linealidad entre la cantidad de hollín (KL_{2C}) y la temperatura (T_{2C}) producto del promediados de radiancia pixel a pixel, el interés radica en poner en claro manifiesto su aplicabilidad y materializar herramientas adicionales que simplifiquen el análisis cuando se abordan volúmenes importantes de información referida a radiancia de llamas, minimizando los efectos no deseados e incontrolados producto de la turbulencia dentro de la cámara de combustión.

Distribución global de zonas de error:

La *Figura 5.7*, resume los resultados obtenidos en cuanto a población de zonas de error para todas las variaciones paramétricas previamente comentadas. Es importante hacer notar a partir de la figura que la solución alcanzada para el modelo de radiancia es altamente robusta. Y es que si atendemos a la proporción de píxeles/área de la llama de solución válida EZ_{OK} ($EZ=1$) frente a los considerados erróneos EZ_{NG} ($EZ=2,3\&4$) la proporción máxima de píxeles con solución errónea ($EZ_{NG}/EZ_{OK} \cdot 100$), es del 10% referido a la variación paramétrica **AT**. En dichas condiciones se presumen las mayores tasas de formación de hollín y la mayor probabilidad de que los procesos de absorción y emisión a lo largo del camino óptico de la llama contribuyan a maximizar incertidumbres y errores de medida en la radiación captada en el receptor, resultando en la mayor proporción de píxeles no-reales. Y es que si por otra parte, si se examinan las variaciones paramétricas restantes (**AD, BD, NO, BT**), el máximo valor alcanzado de píxeles en zonas de error es del 6%.

En los sucesivos apartados, considerando que las incertidumbres asociadas a cálculos erróneos del modelo de radiancia pueden influir en la estadística producto de niveles no físicos de cantidades de hollín así como de temperatura del

mismo, se han excluido de los parámetros estadísticos mostrados todos los resultados de temperatura T_{2C} y KL_{2C} que provienen de los pixeles contenidos en alguna zona de error.

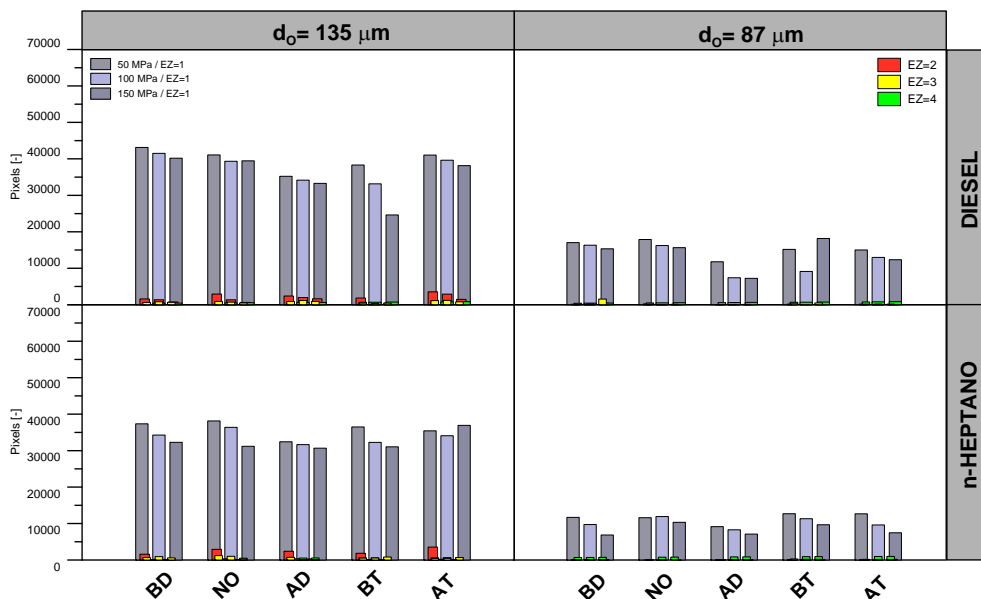


Figura 5.7.- Distribución global de zonas de error resultante del procesamiento de imágenes en el global del estudio paramétrico en la *Tabla 3.6*.

Distribución 1-D y PAI :

Finalmente, el análisis de resultados del método de los dos colores se ha planteado desde un enfoque en el que describe distribución de $T_{2C,1-D}$ y $KL_{2C,1-D}$ a lo largo del eje longitudinal de la llama en la *Figura 5.8*, donde los valores *unidimensionales* son el resultado del promedio de la componente radial de la llama para cada punto del eje de la llama.

Para la condición de operación **BD**-Tobera B se indica la comparación entre:

- El procesamiento con la imagen PAI, esto es, a partir de la imagen media de radiación, a la que se le aplica la máscara del 71% de probabilidad, y se obtienen los mapas de T_{2C} y KL_{2C} , a partir de los cuales se realiza el análisis 1-D.

- El procesado sin imagen PAI, ('ciclos') donde cada par de imágenes de radiación del mismo ciclo se procesa de forma individual para generar un par de mapas de T_{2C} y KL_{2C} . Posteriormente se promedian los 15 mapas de T_{2C} y KL_{2C} obtenidos, y al final se aplica el análisis 1-D sobre estos mapas promedios.

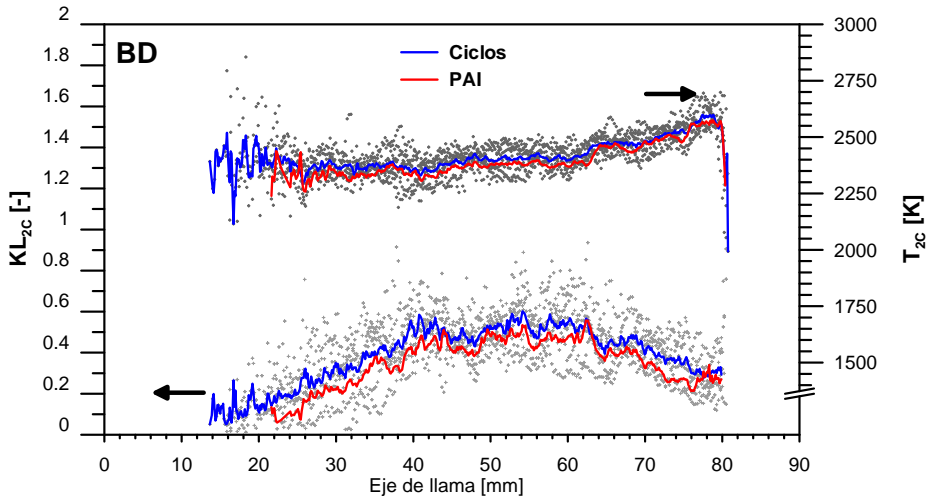


Figura 5.8.- Análisis 1-D de la distribución de KL_{2C} y T_{2C} . Dispersión ciclo a ciclo frente a la imagen PAI. (Condición **BD**-Tobera C -100 MPa-Diesel).

Se puede observar en la figura mediante símbolos la población de datos para todas las llamas ensayadas en la condición de operación y en líneas solidas la evolución de la mediana de la población a lo largo del eje axial de llama de KL_{2C} y T_{2C} resultante del análisis ciclo a ciclo (línea azul) y por otra parte el resultado del procesado de la imagen PAI (línea roja). En cuanto a la evolución de KL_{2C} y T_{2C} , se puede observar que si el interés es conocer su evolución en zonas cerca del lift-off de la llama, la imagen PAI no proporciona información en este sentido debido a que la baja radiancia y oscilante locación de fuentes de emisión de la llaman no superan el criterio de probabilidad previamente definido, sesgando la comparativa con evolución de la media de los ciclos hasta los 22 mm respecto del orificio de la tobera. No obstante, una vez superada tal punto de la llama, la evolución tanto de KL_{2C} y T_{2C} describen un nivel significativamente igual al descrito por la evolución de la media de los ciclos. Aunque en este caso la imagen PAI muestra valores inferiores, la evolución no difiere en un máximo del 9% respecto a la media de los ciclos. Y no menos importante, el hecho de que la imagen PAI muestra tal y como se refieren en la literatura [25] y revisado en la *Figura 2.10* una evolución de KL_{2C} en el que el fenómeno de formación de hollín domina hasta cierta distancia, en este

caso aproximadamente los 48mm donde el KL_{2C} es máximo, para posteriormente dar paso a una zona que se extiende hasta la máxima longitud de la llama donde la oxidación de hollín predomina y el KL_{2C} va decreciendo. En el caso de la temperatura del hollín y como consecuencia de la oxidación, se observa que la T_{2C} se maximiza a medida que nos acercamos a la longitud máxima de la llama tendiendo a la temperatura adiabática de llama al igual que lo revisado en la *Figura 2.11*.

El análisis demuestra que, en general, el uso de la imagen PAI produce resultados muy similares al procesado imagen a imagen, con un mucho menor coste computacional. En consecuencia, los siguientes apartados están desarrollados en función al análisis aportado por la imagen PAI a través del análisis 1-D destacado anteriormente.

5.3. Análisis comparativo del autoencendido y lift-off en combustibles Diesel y n-Heptano

Como se ha comentado en la sección 2.4, la mezcla aire-combustible gobierna los procesos de formación y emisión de contaminantes, entre ellos el hollín. Tal como se advierte, los procesos de autoencendido y localización de la zona reactiva de llama son parámetros fundamentales en el entendimiento del proceso de combustión desde sus inicios hasta llegar hasta el estado cuasi-estacionario que termina con el final de la inyección. Si bien la medida experimental del retraso al autoencendido se obtiene mediante el análisis exhaustivo de la presión en cámaras de combustión, también se puede dar interpretación al fenómeno a partir de estudios ópticos con visualización de alta velocidad.

Tal como refiere Siebers en [26], cuando ocurre el autoencendido se produce un ensanchamiento característico del chorro en imágenes de schlieren obtenidas en una instalación de volumen constante. En este sentido, la *Figura 5.9* muestra cuatro secuencias de imágenes instantáneas de schlieren de la presente investigación, donde se estudia en diferentes condiciones de operación la evolución del chorro en el momento del autoencendido. Tal como se observa en la figura el efecto de temperatura del aire, aumento desde los 778K hasta los 826K, resulta el factor de mayor peso en la disminución del autoencendido desde los 3.137 ms hasta 1.547 ms (reducción de 1.59 ms). Por su parte el aumento de la densidad del aire, desde los 17.8 kg/m³ hasta los 21.2 kg/m³, disminuye el tiempo de auto-encendido desde los 1.637 ms hasta los 1.547 ms (reducción de 0.09 ms). Mientras que efectivamente el efecto de la presión de la inyección, aumentada desde 50 MPa

hasta 150 MPa, resulta en una variación poco significativa en autoencendido de tan solo 0.040 ms.

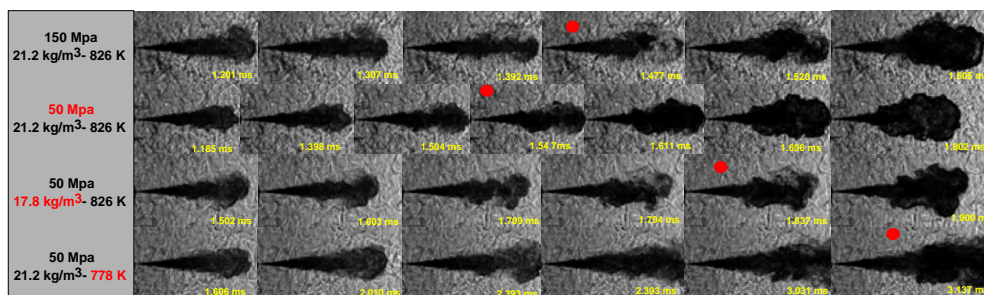


Figura 5.9.- Evolución temporal de chorros reactivos en cámara CPF de combustión. Efectos de la presión de inyección, densidad y temperatura del aire a partir de imágenes de schlieren. Nota: Círculos rojos señalan instante de observación del autoencendido.

Basado en el cálculo del retraso al autoencendido derivado de las imágenes de schlieren (ID_s) la **Figura 5.10**, muestra la relación existente entre los parámetros de operación abordados y el retraso al autoencendido, derivado de la inspección de imágenes de schlieren en busca del instante donde los gradientes de densidad denotan el inicio de combustión. Se han representado los resultados obtenidos en el motor óptico para los dos combustibles del estudio, Diesel y n-Heptano. Partiendo de la condición de variación paramétrica de la temperatura del aire, que coincide con un gráfico típico del retraso de autoencendido de Arrhenius, es notable que la energía de activación (E_a) de ambos combustibles ha de ser similar, coincidiendo con estudios previamente realizados por Idicheria [27] bajo diferentes condiciones de contorno (variabilidad de tasas de EGR, cámara de combustión, etc.) donde los tiempos de retraso no difieren en más de 20 μs entre ambos combustible. El mayor ID_s que se observa en los gráficos inferiores en la **Figura 5.10** es condicionado en mayor parte consecuencia del bajo número de cetano (ver **Tabla 3.1**) y por otro lado a parámetros de mezcla como, la menor cantidad de movimiento imprimida al chorro de n-Heptano (ver **Figura 3.3** - Tobera-B), aunque esto segundo, tal como se ha discutido con profundidad en [9,16] no representa mayor relevancia en cuanto se refiere a modelos empíricos que describan el autoencendido, más si en la robustez del resultado.

Los resultados de la **Figura 5.10** refrendan observaciones hechas en [28,29], sobre la estrecha relación entre el autoencendido y la densidad de aire, según esta última aumenta, el tiempo de autoencendido se reduce sin aparente efecto del tipo de combustible inyectado en las condiciones **BD-NO-AD**. Por otra parte, el efecto de la presión de inyección sobre el autoencendido es poco significativo siendo más evidente en el caso **AD**, lo cual indica una relevancia del efecto de mezcla no tan

significativo como el efecto de aceleración de la cinética de combustión por la variación de la temperatura del aire.

La relación empírica que Nerva propone en [9] para el autoencendido de chorros Diesel en función de parámetros de combustión y de inyección, se ha adaptado aquí según la ecuación 8 a las variaciones en las *Tablas 3.3* y *3.6* en conjunto con las Toberas B-C. La tabla *Tabla 5.1* muestra resultados del modelo empírico en comparación a los determinados por el autor, en donde el retraso al autoencendido (τ) se expresa en función de la velocidad del combustible (u_0), el diámetro de tobera (d_0), la densidad del aire (ρ_{aire}). En este caso, el modelado independiente de cada combustible, resulta en una parametrización en cuanto al autoencendido potencialmente similar para los dos combustibles que forman parte del estudio, salvando la estratificación previamente comentada.

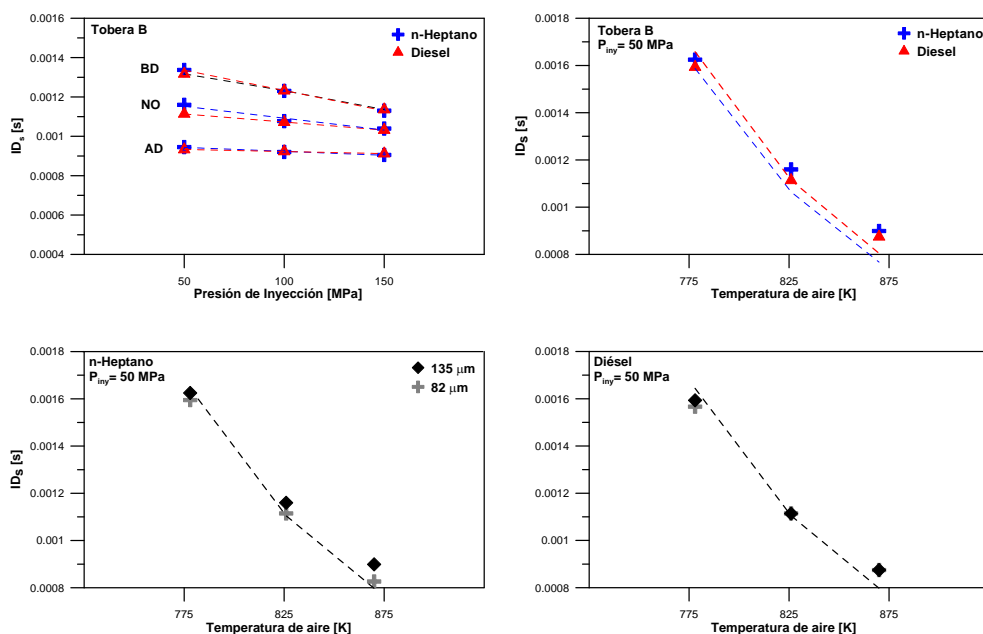


Figura 5.10.- Efectos sobre el autoencendido del Diesel y n-Heptano en las variaciones paramétricas de la *Tabla 3.6* estudiadas en el motor óptico. Superior-Izquierda: Presión de inyección y densidad del aire. Superior-Derecha: Temperatura del aire. Inferior-Izquierda: Diámetro de tobera y n-Heptano. Inferior-Derecha: Diámetro de tobera y Diesel.

$$\tau = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{R \cdot T_{amb}}\right) \cdot \rho_{amb}^a \cdot u_{0,Ber}^b \cdot d_o^c \tag{8}$$

Del modelo resultante del análisis estadístico, se evidencia que el modelado independiente de cada combustible resulta en una parametrización del retraso al autoencendido similar entre combustibles. Las pocas diferencias en los modelos en cuanto los exponentes de la velocidad (diferencias menores de 0.1) y densidad del aire (diferencias entre combustibles menores a 0.05) ejemplifican el comportamiento similar de ambos combustibles en cuanto al autoencendido. Se evidencia al igual que lo observado por Nerva [9], que el efecto de la cinética del combustible englobado en la expresión $[A \cdot \exp(E_a/RT)]$, tiene mayor peso sobre el retraso al autoencendido que cualquiera de los parámetros de mezcla restantes.

Factor	A	E_a	u_0	ρ_{amb}	d_0	R^2
	-	[J/mol]	[m/s]	[kg/m ³]	μm	-
Exponentes en [9]	-	44336	-0.25	-0.37	-	-
Exponentes	-	-	a	b	c	
Diesel	2.03E-05	44475	-0.271	-0.335	0.013	93.8
n-Heptano	2.60E-05	44245	-0.265	-0.396	0.017	94.9

Tabla 5.1.- Resultados del análisis estadístico para la predicción del retraso al autoencendido

Visto el mismo retraso al autoencendido de la llama de Diesel o de n-Heptano, lo que cabría esperar en cuanto a procesos de formación de hollín, aguas abajo de la zona de autoencendido/lift-off [30], sería también una evolución similar entre combustibles. Sin embargo, esta observación chocaría radicalmente con observaciones encontradas en la literatura en cuanto a la formación de hollín en inyección directa de ambos combustibles [27,31], y es en la sección siguiente cuando se analizan tales diferencias.

5.4. Formación de hollín en llamas Diesel y n-Heptano en base a variaciones paramétricas

Previo a la presentación de los efectos aislados de cada una de las variaciones paramétricas sobre los resultados del método de los dos colores, conviene mencionar que en dichas imágenes, se ha observado que bajo las mismas condiciones de operación, la luminosidad/hollín captada en la llama Diesel es mayor a la captada de la llama de n-Heptano, al igual que en [31]. En este escenario, en el ámbito de escalado del proceso de formación de hollín han de existir parámetros que justifiquen la mayor o menor formación de hollín según el combustible que se evalúe. Rescatando resultados del proceso de mezcla presentados en la sección 3.7, la *Figura 5.11* muestra la relación existente entre la longitud líquida y la longitud del lift-off LoL_s (ya definido en el capítulo 4) para el

conjunto de medidas de la variación **BD**, tobera **C**. Es la locación del lift-off la que define el dosado relativo de mezcla en la base de la llama y por ende la propensión a la formación de hollín en la misma. Atendiendo a la definición de Pickett y Siebers [7], el dosado relativo de la mezcla se ha determinado a partir de las ecuaciones 2.4 y 2.11.

En esta parametrización, el dosado relativo en la base de la llama se escala en primera instancia en función de la relación estequiométrica aire/combustible del combustible, y en segunda instancia de la densidad del combustible. Mientras que de la figura *Figura 5.II* se extrae que la variación de la presión de inyección influye sobre la medida del lift-off y por ende en el dosado relativo en esa locación. Es por ello, que un combustible sintético mono-componente tiene una capacidad de englobamiento mayor en la base de la llama. Algo que resulta evidente en el cómputo del ϕ_{LoL} que en el caso de 100 MPa (Ejemplo de la variación de presión de inyección) resulta en $\phi_{LoL-Diesel} = 3.05$ mayor que el caso del Diesel $\phi_{LoL-n-Heptano} = 2.2$, es decir, un procesos de combustión cada vez más pobre en la llama de n-Heptano. Mientras que en la caso de mezcla rica, incluso el lift-off puede ubicarse aguas arriba de la longitud líquida máxima como es el caso Diesel-50MPa lo que es indicador de mayor formación de hollín en la llama.

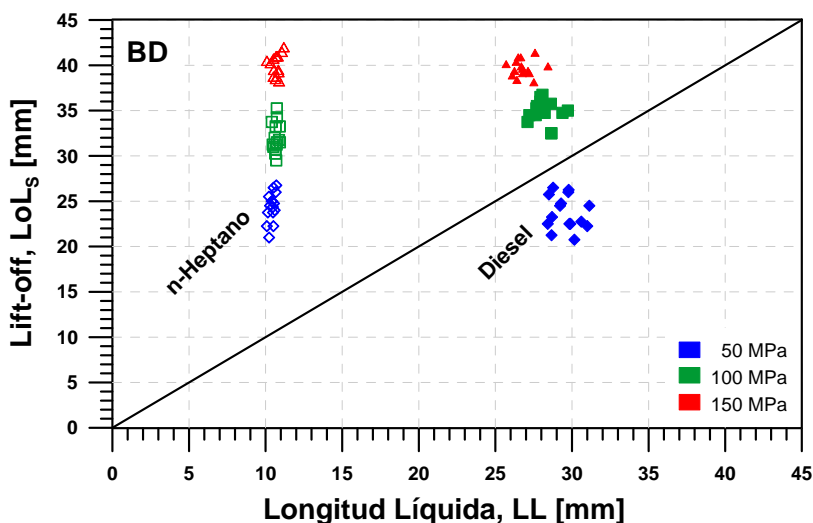


Figura 5.II.- Relación entre longitudes características de evaporación (LL) y combustión LoL_s. Análisis cualitativo de la formación de hollín en llamas Diesel y n-Heptano en el motor óptico (condición **BD**; Tobera C).

A partir de los resultados anteriores, centrados en el autoencendido y el LOLs, ya se está en condiciones de analizar el proceso de formación de hollín en la

llama para los dos combustibles estudiados. El análisis que sigue se ha agrupado en función de la variable paramétrica de estudio.

5.4.1. Presión de inyección

La *Figura 5.13* describe la evolución espacial tanto de KL_{2C} , y T_{2C} , derivados del análisis de la imagen PAI, donde la escala espacial se ha normalizado por el diámetro equivalente (d_{eq}) de cada caso, de manera que a igual coordenada normalizada, el englobamiento de aire es el mismo. En lo que se refiere a la temperatura del hollín, se incluye en los gráficos, la temperatura adiabática de llama estimada en simulaciones *CHEMKIN* a partir del modelo Jerzembeck et al. [32] descrito en profundidad en [33]. En cuanto al efecto de la variación de la presión de inyección, se puede observar cómo existe un escalado en el inicio de la evolución espacial de la temperatura y KL del hollín, aquí llamada SOL (acrónimo en inglés para la longitud mínima donde se observa hollín), tal que $SOL/d_{eq, 50 \text{ MPa}} < SOL/d_{eq, 100 \text{ MPa}} < SOL/d_{eq, 150 \text{ MPa}}$. Se observa en los tres casos un pico inicial de temperatura producto de una concentración de hollín infinitamente pequeña, tanto en la llama Diesel como la de n-Heptano. La temperatura de llama muestra una evolución que varía entre 2250-2700 K, con poca influencia de la presión de inyección $T_{2C, 50 \text{ MPa}} = T_{2C, 100 \text{ MPa}} = T_{2C, 150 \text{ MPa}}$ en la que la temperatura alcanza un máximo en la punta de la llama alcanzando valores del orden de magnitud de la temperatura adiabática de llama.

Del lado de la evolución del KL_{2C} , la evolución axial se ajusta a un polinomio de 2º Grado con el menor error cuadrático medio (ECM), que describe cada nivel de presión de inyección (líneas en color) con una grado de significancia, en ningún caso menor que el % $R^2 = 88\%$. La figura muestra una evolución del KL_{2C} , tal que $KL_{2C, 50 \text{ MPa}} > KL_{2C, 100 \text{ MPa}} > KL_{2C, 150 \text{ MPa}}$ producto como se ha comentado anteriormente en la *Figura 5.12* del mayor englobamiento de aire debido al aumento del lift-off cuando se incrementa la presión de inyección, e indistintamente de la llama observada (Diesel o n-Heptano). Sin embargo, la cantidad de hollín formado es mucho mayor en el Diesel. Puesto que el englobamiento en la base de la de la llama es similar en ambos combustibles. Las diferencias observadas son debidas principalmente a la tendencia a formar hollín como consecuencia de su composición química. En el resultado de la figura, el máximo valor de KL_{2C} , para el Diesel es del orden de 0.64, mientras que para el n-Heptano es del orden del 50% menor.

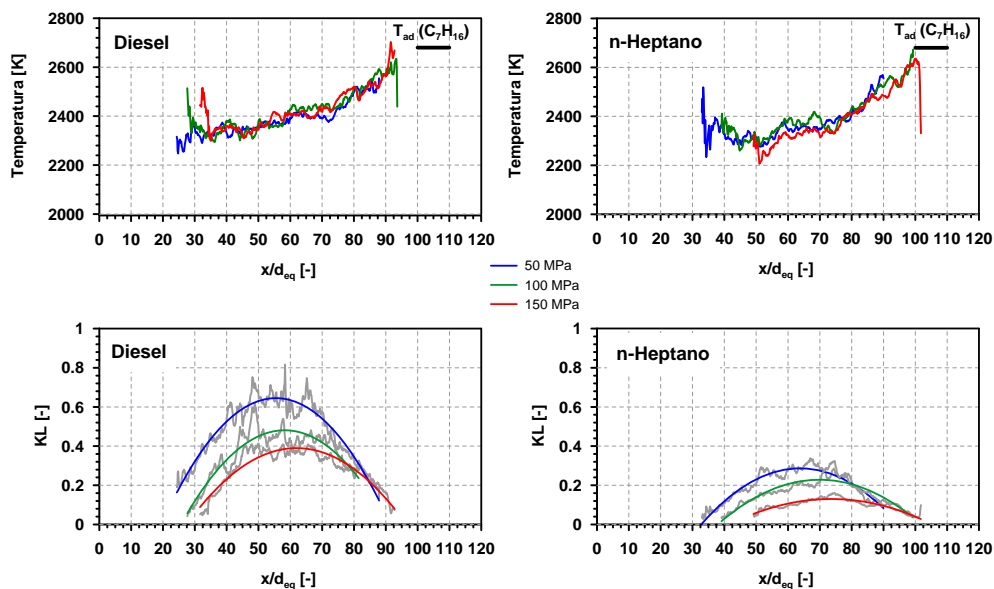


Figura 5.12.- Efectos de la presión de inyección a lo largo del eje de llama de temperatura y KL del hollín. (Variación paramétrica NO; Tobera-B).

5.4.2. Densidad del aire

En la *Figura 5.13* se detalla la evolución de KL_{2C} y T_{2C} , para la variación de densidad del aire abordada en el estudio **BD-NO-AD**. En este caso, las temperaturas adiabáticas de llama mostradas aunque no visibles en la escala presentada varían en un rango ± 10 K del valor destacado en la figura de 2700K. Observando los resultados para el combustible Diesel, la evolución de la temperatura del hollín, que varía entre 2250-2750 K, se ve poco afectada por la densidad del aire tal que $T_{2C, 17.8 \text{ kg/m}^3} \approx T_{2C, 22.7 \text{ kg/m}^3} \approx T_{2C, 27.8 \text{ kg/m}^3}$, de manera similar a lo comentado en la variación de la presión de inyección. No obstante, en cuanto al balance de la evolución KL_{2C} es bastante clara y como consecuencia de un aumento de la densidad de aire $KL_{2C, 27.8 \text{ kg/m}^3} > KL_{2C, 22.7 \text{ kg/m}^3} > KL_{2C, 17.8 \text{ kg/m}^3}$ consecuente con observaciones encontradas en [7] con técnicas alternativas como la extinción de luz.

En el caso de la llama n-Heptano, se puede decir que la evolución de KL_{2C} es análoga al efecto observado sobre el Diesel aunque en escalas de KL menores que

bajo escalas normalizadas x/d_{eq} muestran un máximo KL ubicado espacialmente en la misma escala axial normalizada ($x \sim 70 d_{eq}$). Respecto a la temperatura del hollín T_{2C-1D} es similar hasta $x \sim 80 d_{eq}$, a partir de la cual parece tener una estratificación clara tal que $T_{2C-1D, 17.8 \text{ kg/m}^3} > T_{2C-1D, 22.7 \text{ kg/m}^3} > T_{2C-1D, 27.8 \text{ kg/m}^3}$. Este resultado probablemente sea consecuencia de una disminución del KL de la llama y una temperatura del orden de la superficie de reacción.

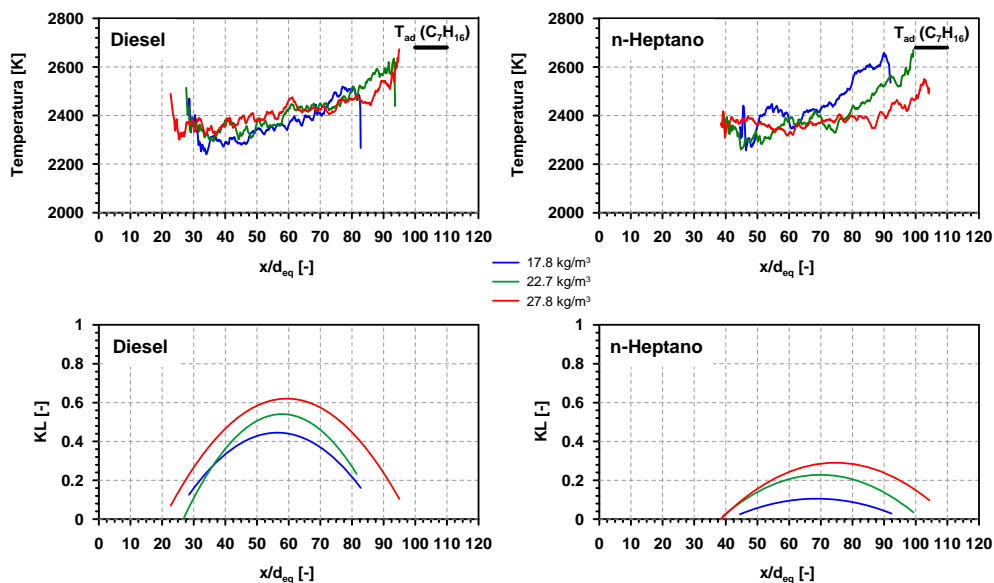


Figura 5.13.- Efectos de la densidad del aire sobre la distribución de temperatura y KL del hollín (Variación paramétrica Tobera B; $P_{iny}=100$ MPa).

5.4.3. Temperatura del aire

En la *Figura 5.14*, se aprecia el efecto del aumento temperatura en la variación BT-NO-AT. En este caso, los procesos térmicos se aceleran como consecuencia de un aumento de la temperatura y, tanto los procesos de formación/oxidación de hollín como la temperatura del mismo difieren en cuanto al balance esperable a partir del modelo de radiancia de la ecuación 5. Tal como se observa en la figura, el aumento de la temperatura adiabática de llama coexiste con un nivel de temperatura del hollín tal que la evolución a lo largo de la llama tal que $T_{2C,778 \text{ K}} < T_{2C,826 \text{ K}} < T_{2C,870 \text{ K}}$ y en una escala menor a los $80 x/d_{eq}$ para ambos combustibles. No obstante tales diferencias entre ensayos desaparecen a medida que alcanzamos

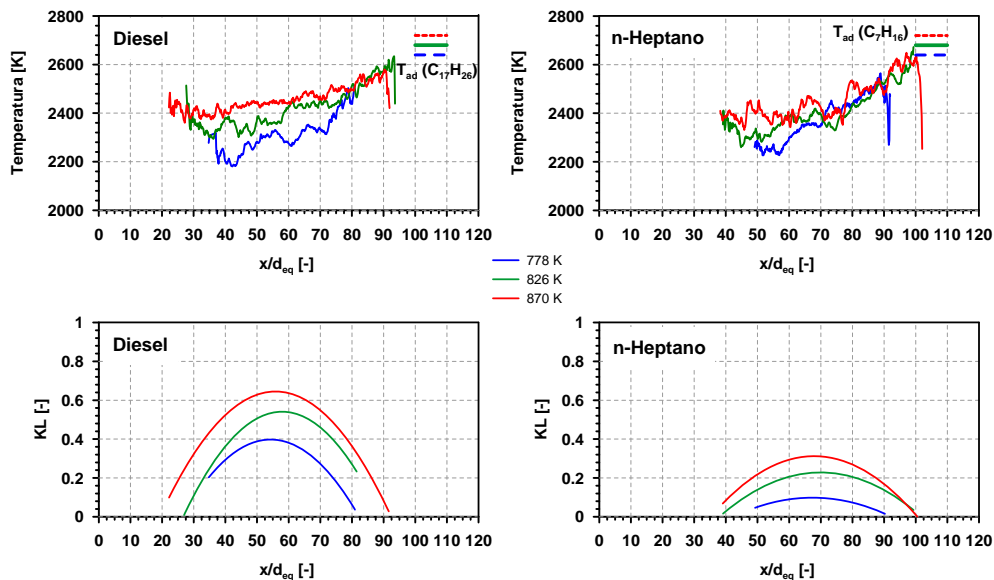


Figura 5.14.- Efectos de la temperatura del aire sobre la distribución de temperatura y KL del hollín (Variación paramétrica Tobera B; P_{iny} : 100 MPa)

la longitud de llama como consecuencia de una cantidad infinitamente pequeña de hollín. Fijando la atención en la evolución de temperatura en el caso de la llama de n-Heptano, las tendencias en la temperatura de hollín en ese rango espacial no responden al aumento de temperatura del aire como en el caso de la llama Diesel. En el caso del KL, la evolución responde a un aumento de temperatura del aire y a una aceleración del proceso de combustión, que conlleva a una disminución de la tasa de englobamiento de aire aguas abajo del lift-off. Para que finalmente resulte en $KL_{2C, 778\text{ K}} < KL_{2C, 826\text{ K}} < KL_{2C, 870}$, con niveles más altos de KL en el caso del Diesel. Es probable que en condiciones en las que se forme suficiente hollín, el método de 2 Colores es capaz de evaluar las diferencias en temperatura, mientras que para situaciones con poco nivel de hollín, como por ejemplo más allá de los 80 deq, las incertidumbres del método crecen [10] y no es capaz de resolver las diferencias en temperatura del hollín observadas en el caso del n-Heptano.

5.4.4. Diámetro de tobera

En la literatura, resulta claro y bien definido el efecto de variación del diámetro de tobera sobre la evolución de la formación de hollín. Siebers en [34] describe y basa las diferencias de formación de hollín en el tiempo de autoencendido del combustible previo alcanzar la longitud del lift-off, ya que un

aumento del tiempo mezcla resulta en una distribución de hollín menor. Tal como indica la **Figura 5.15** la cantidad de hollín formada coincide con las observaciones hechas por Pickett y Siebers [28] sobre un escalado del tal que $KL_{2C-138} > KL_{2C-82}$ al variar el diámetro de la tobera en la **Figura 5.10**.

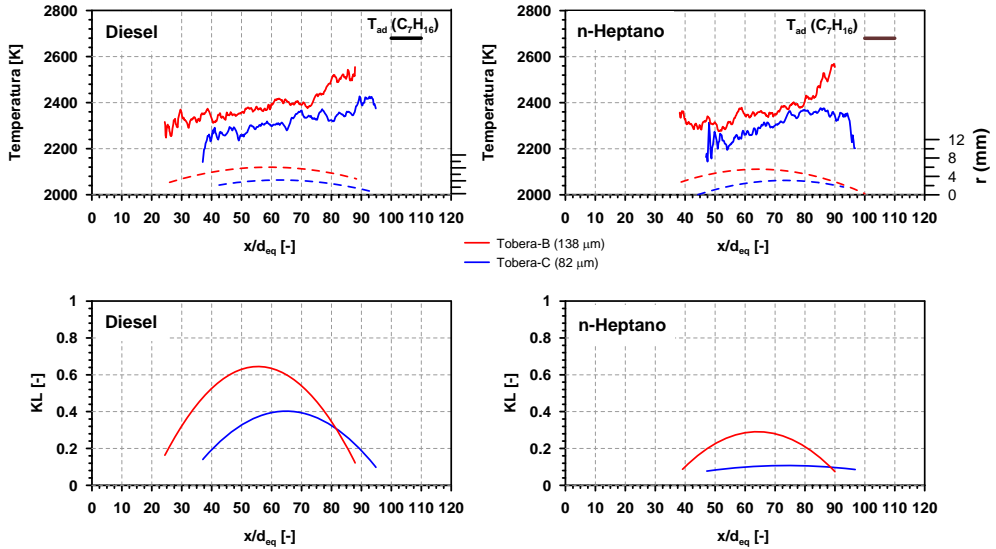


Figura 5.15.- Efectos del diámetro de tobera sobre la distribución de temperatura y KL del hollín (Variación paramétrica NO; $P_{iny} = 50$ MPa). Líneas discontinuas en los gráficos superiores son los radios de llama determinados a partir de la imagen binaria obtenida en el procesado digital.

En ese sentido, atendido a las estimaciones del dosado al lift-off, y sólo observando al efecto del diámetro de la tobera, en el caso del Diesel resulta atribuible una mayor formación de hollín a un dosado más rico en el lift-off, tal que $\phi_{138-Diesel} = 3.3$ es mayor que $\phi_{82-Diesel} = 2.8$. No obstante, al incluir la variable combustible en el cálculo del dosado al lift-off puede decirse que: una vez más que es la composición química más simplificada del n-Heptano la responsable de una menor formación de hollín, ya que la similitud en el dosado al lift-off $\phi_{138-Diesel} \approx \phi_{82-n-Heptano} \approx 3.3$ no atribuye ningún efecto de mezcla a las diferencias en la formación de hollín entre ambas toberas.

En lo que se refiere a la evolución de la temperatura de T_{2C} es de interés destacar en primera instancia que desde el punto de vista de los cálculos de la temperatura adiabática de llama no existen diferencias en cuanto al combustible usado. No obstante, la termometría de dos colores sí que advierte diferencias en la temperatura del hollín. El mayor de diámetro de tobera resulta en una evolución tal que $T_{2C,138} > T_{2C,82}$ en el que la evolución de la temperatura varía entre 2300 K y

2600 K tendiendo a la temperatura adiabática según disminuye la superficie de reacción (menor radio de llama en la figura). Mientras que para la tobera de menor diámetro, la evolución no supera un valor de 2400 K.

En relación a lo comentado, se atribuye a un mayor diámetro de tobera una mayor cantidad de hollín formado y mayor temperatura del aire. Tal resultado es consecuencia principalmente de la transparencia de la llama y del proceso de absorción/emisión que percibe el receptor (en este caso, el sensor de ambas cámaras). Y es que con mayor diámetro de tobera el ancho de llama aumenta tal como se observa en la *Figura 5.15* y el receptor percibe mayoritariamente la radiación proveniente de hollín ubicado cerca de la superficie de reacción, donde se encuentran las mayores temperaturas de llama.

5.5. Discusión

La *Tabla 5.1* resume las tendencias observadas en esta tesis que relacionan las variaciones paramétricas abordadas con información de la literatura. En general, el presente trabajo es capaz de reproducir y resaltar las tendencias esperadas en cuanto a una mayor formación de hollín para llamas que se genera a partir de una mayor densidad del aire, temperatura del aire y mayor diámetro de tobera, y como consecuencia de una menor presión de inyección.

No obstante, la evolución de la temperatura del hollín a partir de la imagen PAI y su respuesta a una variación paramétrica no puede interpretarse tal como indica la literatura. Si bien se aprecia en el estudio paramétrico un cambio de T_{2C} cuantitativamente justificable, existen casos en el espectro de variaciones (p. ej. diámetro de tobera), donde la variación de temperatura responde más a un cambio en la propagación de la radiación que a un cambio real de la mismas. En estos casos, los procesos de absorción/emisión a lo largo del camino óptico de la llama resultan definitivos en el proceso, y por lo tanto es de admitir que se necesite investigación complementaria acerca de los procesos que ocurren a lo largo del camino óptico de la llama.

No obstante, la evolución de la temperatura del hollín a partir de la imagen PAI y su respuesta a una variación paramétrica no puede interpretarse tal como indica la literatura. Si bien se aprecia en el estudio paramétrico un cambio de T_{2C} cuantitativamente justificable, existen casos en el espectro de variaciones (p. ej. diámetro de tobera), donde la variación de temperatura responde más a un cambio en la propagación de la radiación que a un cambio real de la mismas. En estos

casos, los procesos de absorción/emisión a lo largo del camino óptico de la llama resultan definitivos en el proceso, y por lo tanto es de admitir que se necesite investigación complementaria acerca de los procesos que ocurren a lo largo del camino óptico de la llama.

Se ha profundizado en el análisis de formación de hollín comparando los dosados relativos en la base de la llama con el valor máximo de hollín encontrado en la misma, y cuantificado en términos de KL_{2C} . El resultado aparece en la *Figura 5.16* Al igual como se describe en la literatura [7], un aumento del dosado de mezcla por una disminución de la presión de inyección o por aumento de la densidad del aire, resulta en niveles más altos de KL_{max} . Si bien la figura representa una muestra altamente dispersa (inducida por la variabilidad del lift-off de la llama en el motor óptico), sí que es rescatable la respuesta estratificada en la formación de hollín tal como se ha observado en [9] mediante la técnica de extinción de luz. Queda patente, por tanto, la relación entre dosado al lift-off y KL_{2C} en la llama.

Variación	LoL / ϕ_{LoL}	f_v	$T_{hollín}$	Presente tesis	
				K_{2C}	T_{2C}
Presión de Inyección	↑↑ / ↓↓	↓↓	↑↑	↓↓	≈
Temperatura del Aire	↓↓ / ↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Densidad del Aire	↓↓ / ↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	≈
Diámetro de Tobera	↑↑ / ↑↑	↑↑	≈	↑↑	↑↑

Tabla 5.3.- Reumen de los resultados obtenidos de en esta tesis al variar de parámetros de combustión. Comparativa con tendencias encontradas por Pickett y Siebers [28] en cuanto a formación de hollín. Tendencias de temperatura del hollín rescatada de los trabajos de Pastor [8], Nerva [9], Payri [10] y García [11].

En vista de lo anterior, es admisible una vez más en esta tesis el carácter sesgado que puede rondar la aplicación de la termometría de dos colores. La poca diferencia que se aprecia en el KL_{max} entre las condiciones **BD** y **NO** (véase parte superior de la *Figura 5.16* está en relación presumiblemente con los procesos de absorción y emisión dentro de la llama Diesel, más propensa a formar hollín. La

sensibilidad del KL_{\max} es tal, que el salto de densidad del aire ha de ser importante (la densidad en el **AD** es del orden de 1.6 veces la del **BD** en el caso del Diesel). En el caso del n-Heptano, menos propenso a formar hollín, dentro del salto de densidades de aire planteadas sí que responde de acuerdo a lo esperado (menor densidad, menor formación de hollín). Es el menor contenido de carbono en el n-Heptano lo que minimiza el efecto no cuantificado de la propagación de la radiación a lo largo del camino óptico de la llama. Por lo que el sesgado de la información relativa a la luminosidad captada por el sistema óptico de termometría es menor en llamas transparentes como es la del n-Heptano.

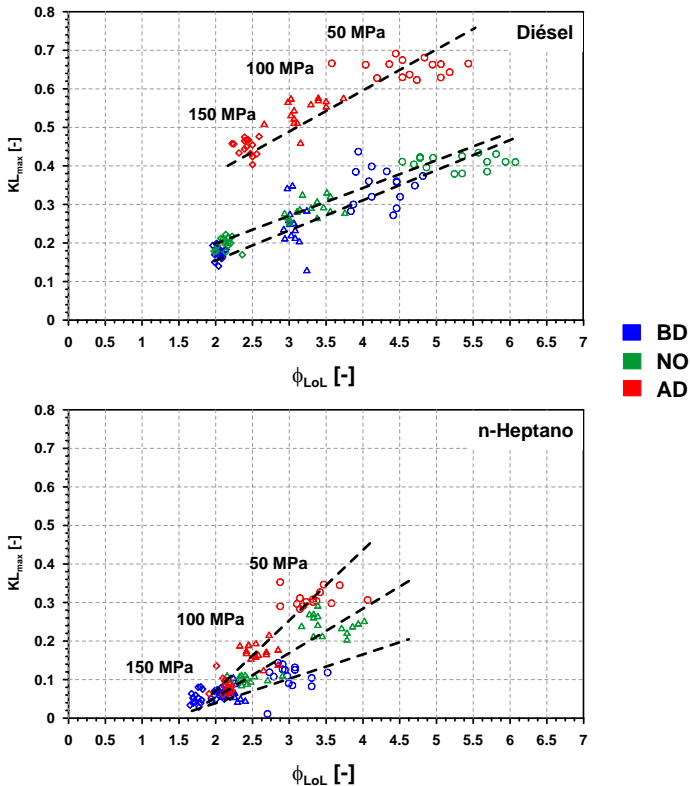


Figura 5.16.- Relación entre englobamiento de aire en la base de la llama y KL_{\max} estimado a partir de la solución empírica de la ecuación 5. Efectos sobre la distribución media en llamas Diesel y n-Heptano. (Tobera-B $d_0=138 \mu\text{m}$, variación de densidad).

Sin embargo, dentro de la incertidumbre asociada a esta medida se puede dar cuenta de la realidad del proceso de combustión entre combustibles, ya que se confirma que el n-Heptano es un combustible menos propenso a la formación de hollín respecto al Diesel en un factor que varía entre 2 y 2.5 para un mismo dosado

al lift-off. Este escalado si bien resulta muy distante del factor 10 que ha determinado Idicheria et al. [27]. Aunque las medidas de este último autor parten de métodos alternativos como la extinción de luz en condiciones de contorno diametralmente opuestas a las abordadas en este documento (cámara de combustión de volumen constante, diámetro de tobera, tasa de EGR, entre otros) por lo que cabe esperar las diferencias previamente comentadas.

Es importante resaltar que las observaciones vertidas en este documento provienen de un estudio de llamas propensas a la formación de hollín, dado que la atmósfera de la cámara de combustión del motor óptico estaba libre de la recirculación de gases de escape. Actualmente, el estado del arte de procesos de combustión Diesel tiende a procesos de combustión con altas tasas de EGR y por ende en la combustión de baja temperatura, es decir, con muy baja luminosidad del hollín. En ese sentido, la extensibilidad de esta metodología a investigación de procesos de inyección altamente transitorios y con baja reactividad, debe estar acompañada con la adaptación de sistemas ópticos de intensificación que permitan potenciar la recepción de baja emisión de radiancia esperada. Y así mejorar la determinación de la cantidad de hollín y su temperatura a partir de esta técnica.

Por último, la adición de técnicas análogas permitirá ahondar en el cómo influyen los procesos de absorción y emisión a lo largo del camino óptico mediante la aplicación de la técnica *Incandescencia Inducida por Láser* [35] y/o *la extinción de luz* [36] para conocer los límites físicos de la aplicación de la termometría de dos colores. Ello permitirá profundizar en cuáles son las fuentes de incertidumbre asociadas a la poca sensibilidad del sistema a la variación en la temperatura y concentración del hollín, pudiendo contribuir al entendimiento de la disparidad de los factores de escalado de KL_{2C} entre combustibles encontrados en este estudio y lo reportado en [27] mediante la extinción de luz. Así como también, en las discrepancias entre el entendimiento de la temperatura adiabática de llama y las medidas experimentalmente obtenidas mediante la termometría de dos colores.

5.6. Conclusiones

Dentro del marco experimental planteado en el capítulo 2 y relacionado con la investigación mediante la termometría de dos colores, se han puesto en consideración los aspectos experimentales considerados como fundamentales para abordar un análisis cuantitativo de la cantidad de hollín formado dentro de la llama y la temperatura del mismo, de lo que cabe destacar:

- El entorno experimental resulta fundamental en la implementación de la termometría de dos colores, en el que el uso de una cámara para cada longitud de onda resulta cuantitativamente en una mejor aplicabilidad de la técnica.
- El potencial de la definida imagen PAI como elemento de análisis de enfoques experimentales que abordan variaciones paramétricas como las examinadas en esta tesis tienen estrecha relación con aproximaciones analíticas planteadas en la literatura y que están relacionadas con una variabilidad ciclo a ciclo del proceso de cuantificación del hollín y su temperatura.
- La composición química del n-Heptano, más simple si se la compara con la del combustible Diesel, favorece el proceso de englobamiento aguas arriba del lift-off de la llama, que en definitiva es el parámetro fundamental para el entendimiento de la formación de hollín en las condiciones cuasi-estacionarias evaluadas.
- La comparativa mediante la termometría de dos colores entre ambos combustible arroja que el KL máximo de la llama Diesel es mayor tanto como 2.5 veces lo cuantificado con n-Heptano como combustible.
- Bajo las estimaciones del dosado de mezcla al lift-off, existe una relación proporcional entre este y el KL máximo de la llama con un límite físico en la formación de hollín para dosados $\phi_{LoL} \approx 1,7$ en el caso del n-Heptano y $\phi_{LoL} \approx 2$ en el caso del Diesel. Estos valores están muy ligados a lo cuantificado en estudios previos revisados durante el planteamiento de esta tesis en el capítulo 2.
- Consistente con lo referenciado en la literatura, la cantidad de hollín cuantificada parece estar asociada o bien sesgada a la distribución de hollín cerca de la superficie de reacción de la llama. Por lo que el fenómeno de propagación de la radiación de la llama sigue resultando incierto en condiciones propensas a la formación de hollín como en el caso del Diesel en este trabajo.

Relativo a las estimaciones de la temperatura del hollín se confirma, independientemente de la variación paramétrica, un espectro de temperaturas a lo largo del eje de llama siempre limitada por el máximo esperable en la superficie de reacción, es decir, menor que la temperatura adiabática de llama. Mientras que en

el análisis aislado de las variaciones paramétricas, son la temperatura y densidad del aire los parámetros con mayor sensibilidad sobre la estimación de temperatura a partir de la técnica. El primero, por inducir proporcionalmente un cambio global en las temperaturas de combustión y por lo tanto en la temperatura de llama y/o del hollín. Mientras que la densidad del aire, si bien no tiene efecto significativo sobre la química de combustión, ocurre que a niveles muy bajos de hollín, como en el caso del n-Heptano y menor densidad de aire, inducen a que la temperatura medida mediante el dos colores aumente en consecuencia de una mayor transparencia de llama.

El rol de la cantidad de hollín resulta fundamental en la estimación de la temperatura, ya que en el caso de la llama Diesel la temperatura no varía con una mayor estimación de KL_{2C} . Algo que también se ve reflejado en la variación del diámetro de tobera, donde los efectos de propagación de la radiación inducen variaciones en la temperatura del hollín no esperadas. En ese sentido resulta imperante para trabajos futuros abordar la termometría de dos colores en conjunto otras herramientas experimentales adicionales, para cuantificar los efectos de absorción y de propagación de la radiación de la llama a lo largo del camino óptico.

5.7. Anexo

$\#f_{550} / \#f_{650}$	Tiempo de Exposición [ms]	Ordenada 550 nm	Pendiente 550 nm	Ordenada 650 nm	Pendiente 650 nm
2.8 / 2.8	30	-1.94	202.69	43.81	52.72
3.5 / 2.8	25	-2.50	128.27	45.00	42.83
4 / 2.8	15	-0.64	53.54	44.70	25.90
2.8 / 2.8	20	-1.42	74.44	45.43	34.23
3.5 / 2.8	22	-0.98	80.66	45.76	37.38
4 / 2.8	23	-0.64	84.25	46.13	39.08
2.8 / 2.8	24	-0.90	87.02	45.91	40.71
3.5 / 2.8	25	-0.44	90.91	46.39	42.43
4 / 2.8	26	0.72	92.85	46.38	44.02
2.8 / 2.8	27	1.69	93.14	46.71	45.44
3.5 / 2.8	28	-2.58	106.26	42.66	50.63
4 / 2.8	30	-2.53	114.85	42.73	54.17
2.8 / 2.8	33	-2.56	126.10	42.85	59.40
3.5 / 2.8	35	-2.21	131.41	43.08	62.90
4 / 2.8	38	-2.31	142.20	42.77	68.34
2.8 / 2.8	40	-2.90	152.44	42.74	71.88
3.5 / 2.8	45	-2.71	168.52	42.96	80.66
4 / 2.8	50	-3.37	185.53	43.72	88.69
4 / 4	30	-2.62	115.22	44.80	32.72
5 / 2.8	20	-1.61	53.89	45.46	34.12
5 / 2.8	23	-1.50	61.78	46.03	39.05
5 / 2.8	25	-1.33	66.30	46.20	42.44
5 / 2.8	30	-3.18	84.28	43.00	53.98
5 / 2.8	35	-3.31	97.31	43.20	62.82
5.6 / 4	25	-1.16	47.66	45.02	27.06
5.6 / 4	28	-2.80	56.28	43.76	31.37

Configuraciones de cámaras de visualización en estudio de termometría de dos colores. $\#f$ de lentes acopladas, tiempo de exposición y ajuste de mínimos cuadrados de rectas de calibración ND \rightarrow Radiancia como el ejemplo mostrado en la Figura 5.5.

5.8. Referencias

- [1]. Zhao H., Ladommatos N., “Optical diagnostics for soot and temperature measurement in diesel engines”. *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol 24, pp. 221-255, 1998.
- [2]. di Stasio S., Massoli P., “Influence of the soot pyrometry uncertainties in temperature and volume-fraction measurements by two-colour pyrometry”. *Meas. Sci. Technol.*, Vol.5, pp 1453-1465, 1994.
- [3]. Matsui Y., Kamimoto T., Matsuoka S., “A study on the time and space resolved measurement of flame temperature and soot concentration in a DI diesel engine by the two-color method”. *SAE Paper* 790491, 1979.
- [4]. Takeda Y., Keiichi N., Keiichi N., “Emission characteristics of premixed lean diesel combustion with extremely early staged fuel injection”. *SAE Paper* 961163, 1996.
- [5]. Kamimoto T., Murayama Y., “Re-examination of the emissivity of diesel flames”. *Int. J. Engine Res.*, Vol. 12, pp. 580-600, 2011.
- [6]. Singh S., Reitz R., Musculus M., “2-Color thermometry experiments and high-speed imaging of multi-mode diesel engine combustion”. *SAE Paper* 2005-01-3842, 2005.
- [7]. Pickett L. M., Siebers D. L., “Soot formation in diesel fuel jets near the lift-off length”. *Int. J. Engine Res.*, Vol. 7, pp. 2103-130, 2006.
- [8]. Pastor J., García J. M., Pastor J., Buitrago J., “Analysis methodology of diesel combustion by using flame luminosity, two-colour method and laser-induced incandescence”. *SAE Paper* 2005-24-012, 2005.
- [9]. Nerva J. G., “An assessment of fuel physical and chemical properties in the combustion of a diesel spray”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2013.
- [10]. Payri F., Pastor J. V., García J. M., Pastor J. M., “Contribution to the application of two-colour imaging to diesel combustion”. *Meas. Sci. Technol.*, Vol 18, pp. 2579-2598, 2007.
- [11]. García, J. M, “Aportaciones al estudio del proceso de combustión turbulenta de chorros en motores diese de inyección directa”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2004.
- [12]. Zhanga J., Jinga W., Roberts W. L., Fang T., “Soot temperature and KL factor for biodiesel and diesel spray combustion in a constant volume combustion chamber”. *Applied Energy*, Vol. 107, pp. 52-65, 2013.
- [13]. Dec J., Espey C., “Ignition and early soot formation in a di diesel engine using multiple 2-d imaging diagnostics”. *SAE Paper* 950456, 1995.
- [14]. Dec J., Espey C., “Chemiluminescence imaging of autoignition in a DI diesel engine”. *SAE Paper* 982685, 1998.

- [15]. Higgins B., Siebers D. L., Aradi A., “Diesel-spray ignition and premixed-burn behavior”. *SAE Paper* 2000-01-0940, 2000.
- [16]. Musculus M., Lachaux T., Pickett L., Idicheria C., “End-of-injection over-mixing and unburned hydrocarbon emissions in low-temperature-combustion diesel engines”. *SAE Paper* 2007-01-0907, 2007.
- [17]. Knox B., Genzale C., Pickett L., Garcia J. et al., “Combustion recession after end of injection in diesel sprays”. *SAE Int. J. Engines*, Vol: 8(2), pp. 679-695, 2015.
- [18]. Pastor J. V., Pastor J. M., Gimeno J., Nerva J. G., “The effect of biodiesel fuel blend rate on the Liquid-phase fuel penetration in Diesel engine conditions”. *SAE Paper* 2009-24-0051, 2009.
- [19]. Pastor J. V., Payri R., Gimeno J., Nerva J. G., “Experimental study on RME blends: Liquid-phase fuel penetration, chemiluminescence, and soot luminosity in diesel-like conditions”. *Energy Fuels*, Vol. 23, pp. 5899-5915, 2009.
- [20]. Pastor J. V., Arrégle J., García J. M., Zapata L. D., “Segmentation of diesel sprays images with loglikelihood ratio test algorithm for non-Gaussian distributions”. *Appl. Opt.*, Vol 46, pp. 888-899, 2007.
- [21]. Pastor J. V., Arrégle J., Palomares A., “Diesel spray segmentation with a likelihood ratio test”. *Appl. Opt.*, Vol 40, pp. 1-10, 2001.
- [22]. David G., Measure de la température et de la concentration en suies de flammes diesel”. *Projet de Fin d’Étude, Institut Supérieur de l’Automobile et des Transports*, 2011.
- [23]. Pastor J. V., Payri R., Garcia J., Briceno F., “Analysis of transient liquid and vapor phase penetration for diesel sprays under variable injection conditions”. *Atomization and Sprays*, Vol. 21, pp. 503-520, 2011.
- [24]. Han D., Mungal M.G., “Direct measurement of entrainment in reacting/nonreacting turbulent jets”. *Combustion and Flame*, Vol. 124(3), pp. 370–386, 2001.
- [25]. Nerva J., Yamaguchi T., Iguma H., Nishigai H. et al., “Transmission electron microscopy of soot particles sampled directly from a biodiesel spray flame”. *SAE Paper* 2011-01-2046, 2011.
- [26]. Arcoumanis C., Kamimoto T., *Flow and combustion in reciprocating engines*. Springer-Verlag, 2009.
- [27]. Idicheria C. Pickett L., “Soot formation in diesel combustion under high-EGR conditions”. *SAE Paper* 2005-01-3834, 2005.
- [28]. Pickett L., Siebers D., “Soot in diesel fuel jets: effects of ambient temperature, ambient density, and injection pressure”. *Combustion and Flame*, Vol. 138, pp.114–135, 2004.
- [29]. Siebers D., Higgins B., “Flame lift-off on direct-injection diesel sprays under quiescent conditions”. *SAE Paper* 2001-01-0530, 2001.

- [30]. Pickett L., Siebers D., Idicheria C., "Relationship between ignition processes and the lift-off length of diesel fuel jets". *SAE Paper* 2005-01-3843, 2005.
- [31]. Mancaruso E., Vaglieco B., "An experimental comparison of n-Heptane, RME and diesel fuel on combustion characteristics in a compression ignition engine". *Fuel Processing Technology*, Vol. 107, pp. 44-49, 2013.
- [32]. Jerzembeck S., Petersa N., Pepiot-Desjardins P., Pitsch H., "Laminar burning velocities at high pressure for primary reference fuels and gasoline: Experimental and numerical investigation". *Combustion and Flame*, Vol. 156 pp. 292-301, 2009.
- [33]. Domenech V., "Estudio de nuevas estrategias para el control de la combustión en modos parcialmente premezclados en motores de encendido por compresión". *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2013.
- [34]. Siebers D., "Recent developments on diesel fuel jets under quiescent conditions". *Flow and Combustion in Reciprocating Engines*, Springer, capítulo 5, pp. 306-357, 2009.
- [35]. Bobba M., Musculus M., "Laser diagnostics of soot precursors in a heavy-duty diesel engine at low-temperature combustion conditions". *Combustion and Flame*, Vol. 159, pp. 832-843.
- [36]. Musculus M., Pickett L. "Diagnostic considerations for optical laser-extinction measurements of soot in high-pressure transient combustion environments", *Combustion and Flame*, Vol: 141. pp. 371-391, 2005.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

Contenido

6.1. Conclusiones	183
6.2. Trabajos futuros.....	187
6.3. Referencias.....	189

6.1. Conclusiones

Llegado el momento de cerrar el presente documento, es necesario hacer retrospectiva de la información en los capítulos anteriores con la idea de focalizar dentro de los objetivos principales de este estudio cuáles han sido los aspectos relevantes conseguidos. En este sentido, si bien resultaría inaceptable que la investigación previamente descrita se considere cerrada y por lo tanto sin dirección alguna, algunos tópicos permanecen abiertos. Por lo que es necesario resaltarlos y así poder dar una visión de los posibles rumbos que pueda tomar la actividad investigadora, tal como se expone al final de este capítulo.

Cuanto menos, necesario es trasladarse al *capítulo 1* y recuperar la idea de cuál era el objetivo principal de esta tesis, siendo este: *cuantificar una serie de parámetros que gobiernan la evolución transitoria de llamas Diesel en condiciones típicas de combustión convencional, así como proveer de herramientas para el análisis del proceso de la formación de hollín y su temperatura en un entorno cuasi-estacionario*. Así de manera general es la visión que ha mantenido la estructura de investigación de esta tesis con la idea de sumar al entendimiento de la llama Diesel elementos considerados como al menos poco estudiados.

Cierto es que la investigación, vino precedida por un entendimiento bastante elevado en la literatura relativo a la llama de difusión y a la aplicación de técnicas ópticas para su análisis. Aunque cierto es, que tras la revisión literaria descrita en el **capítulo 2**, se ha ubicado el punto de partida de esta tesis en dos aspectos relevantes. En primer lugar, el poco consenso literario sobre la evolución transitoria de chorros Diesel. En segundo lugar, las incertidumbres asociadas a la cuantificación del hollín a partir de la luminosidad de la llama. A partir de ello, y a través del documento se advierte el carácter fuertemente experimental asociado a esta tesis, el cual se resume en la aplicación de técnicas ópticas para la descripción de chorros inertes y chorros reactivos, que han sido la base de esta investigación.

El **capítulo 3** ha abarcado la descripción del material óptico y técnicas de visualización utilizadas consideras como el “estándar” para la descripción de parámetros de la llama Diesel en la literatura, como la longitud líquida (usando Mie-scattering), la penetración del chorro (usando schlieren) y el lift-off de la llama (usando quimioluminiscencia del OH*). Y es a partir de este punto donde podemos considerar de enumerar aquellos aspectos de valor añadido de este documento en condiciones inertes y que parten del estudio comparativo realizado entre las dos instalaciones de combustión usadas, el motor óptico y la maqueta CPF:

- La aplicación de Mie-scattering en la investigación de la longitud líquida se advierte conceptualmente similar entre las instalaciones dentro de la hipótesis de un chorro controlado por mezcla. No obstante, las diferencias en cuanto a la longitud líquida máxima obtenidas están asociadas no a las condiciones dentro de la cámara de combustión sino a las condiciones de refrigeración del portainyector. Siendo mejor controlada en la maqueta CPF, la tendencia es de obtener una longitud líquida máxima del orden de 1.7 veces menor respecto a la del motor óptico.
- El estado estacionario en cuanto a condiciones de contorno de la maqueta CPF de flujo constante a alta temperatura hace que sea el entorno considerado como ideal para investigaciones relativas a la evolución del chorro mediante la técnica de schlieren. Aspectos como la poca velocidad del flujo del aire facilitan el estudio de la penetración de chorro con técnicas como schlieren. Mientras que la dinámica del aire dentro del motor óptico, de inicio dificulta una medida sistemática fiable de la penetración del chorro, simplemente por la incertidumbre asociada al análisis digital de imágenes en condiciones donde el combustible se diluye considerablemente con el aire (alta temperatura) o en aquellos casos donde la cantidad de movimiento del chorro es muy baja (diámetros de toberas reducidos o baja presión de inyección).

También en el **capítulo 3**, se ha propuesto las mejoras al montaje óptico del sistema schlieren que permita su aplicación a la visualización del chorro reactivo.. Solución que partiendo de un tiempo de exposición de cámara muy reducido y un filtrado espectral de la radiación de la llama ha dado como resultado la imagen “zero-blooming”, es decir, una imagen sin información relativa a la luminosidad del hollín, lo que ha vistas de resultados aportados en [1] mejora significativamente la medida sistemática de la penetración en chorros reactivos. Este aporte netamente experimental es lo que ha llevado a dar respuesta a parte del objetivo de esta tesis *la evolución transitoria de la llama Diesel en el capítulo 4*.

Adicionalmente, a partir de la imagen schlieren con resolución temporal se ha desarrollado y sistematizado la medida del lift-off de la llama Diesel. Dicha metodología no poseía antecedentes en la literatura, y por lo tanto por primera vez ha sido aplicada dentro del grupo CMT-Motores Térmicos. Aprovechando el ensanchamiento radial que sufre la llama durante y posterior al autoencendido en la transición entre la zona inerte y reactiva del chorro, se ha calculado la longitud de lift-off derivada del schlieren, LoL_s , que puede considerarse como una medida propia en llamas reactivas además de la penetración y/o el ángulo de chorro. La comparativa con medidas de luminosidad tanto con resolución temporal como en el estado cuasi-estacionario, prueban que la medida de LoL_s es una medida altamente fiable en condiciones de combustión de alta temperatura. Se han encontrado las mayores discrepancias en condiciones de combustión de baja temperatura al ser comparado el resultado de schlieren con las medidas de la quimioluminiscencia de OH^* . Por otra parte en la comparación con medidas con resolución temporal proveniente de la luminosidad de amplio espectro [2] LoL_s describe evoluciones idénticas.

Siguiendo con el análisis derivado de la imagen de schlieren, el Capítulo 4 ha desarrollado un amplio estudio en diferentes condiciones de operación. Si bien las consideraciones experimentales han sido amplias, a partir de una condición base se ha definido que la evolución transitoria de la llama Diesel transcurre en cinco fases, tal como se describen a continuación:

- I. *Fase No-reactiva*, previa al autoencendido y donde los procesos de mezcla ocurren de la misma forma que en el caso de inyectar en una atmósfera carente de oxígeno.
- II. *Fase de Autoencendido*, donde el volumen del chorro aumenta súbitamente por el establecimiento del proceso de combustión. Axialmente la expansión no resulta tan importante como en la dirección radial. Esta fase,

ocurre en una ventana temporal muy corta (del orden de 200 us) en la que la expansión radial está asociada con una caída de la densidad local.

- III. *Fase de estabilización*, donde la penetración reactiva es similar al caso inerte. Si se conserva el momento del chorro, la caída de densidad es compensada por el acusado aumento radial del chorro, con lo que el flujo reactivo no penetra más rápido que el inerte.
- IV. *Fase de aceleración*, donde el chorro reactivo penetra sensiblemente más rápido que el caso inerte. Eventualmente, el chorro reactivo se separa definitivamente y la tasa de penetración Sr/Si crece constantemente a lo largo del tiempo.
- V. *Fase cuasi-estacionaria*, donde la tasa de penetración Sr/Si alcanza un valor estacionario máximo en el rango 1-1.13 dentro de las condiciones investigadas en esta tesis.

A partir de esta descripción, las escalas temporales y axiales en las que ocurren las distintas fases de la penetración en reactivo se modifican en relación con las variaciones paramétricas afrontadas en este trabajo. El aumento de la temperatura de llama y la densidad del aire se han observado inducir un devenir más acelerado de las fases previamente comentadas, de igual manera que el aumento de la presión de inyección. No está claro, en cambio, el efecto del diámetro de tobera. Se ha observado una fase estacionaria de penetración del chorro reactivo, en la que la tasa de penetración del mismo respecto al inerte parece no depender de la presión de inyección ni la densidad, y sí de la temperatura. En el caso del diámetro, esta tendencia no estaba clara por la presencia del final de la ventana. Ello implicaría que a los mecanismos de control de la penetración del chorro inerte, únicamente hay que añadir la temperatura del ambiente, relacionada con las temperaturas del proceso de combustión, y por tanto con la expansión sufrida por el chorro en la transición inerte-reactivo.

Finalmente, en el **capítulo 5** se ha contextualizado y definido las condiciones del entorno experimental para la aplicación de la termometría de dos colores, y así dar respuesta al segundo objetivo específico planteado como ha sido el de *proveer de herramientas para el análisis del proceso de la formación de hollín y su temperatura en un entorno cuasi-estacionario*. Los aportes de esta tesis para la aplicación de esta técnica desde el punto de vista experimental se pueden resumir en la aplicación de un nuevo arreglo óptico con dos cámaras que mejora sustancialmente la relación espacial entre pares de imágenes con contenido espectral diferente. Mientras que en el análisis de imágenes, la imagen PAI ha

mostrado su potencial para describir los procesos inherentes a KL_{2C} y T_{2C} de manera similar a lo revisado en la literatura.

La investigación realizada ha comparado dos combustibles, el Diesel estándar y el n-Heptano, combustibles con similar índice de cetano pero gran diferencia en cuanto a la formación de hollín. El trabajo realizado en el motor óptico, ha permitido confirmar que el tiempo de retraso al autoencendido es similar en ambos combustibles. Sin embargo, la cantidad de hollín derivada de la termometría de Dos Colores en términos de KL_{2C} es mayor para el Diesel frente al n-Heptano, que es un hidrocarburo de cadena sencilla y sin presencia de aromáticos. En términos de KL_{2C} es del orden de 2.5 veces mayor en el caso del Diésel para el compendio de condiciones evaluadas presión de inyección, densidad/temperatura del aire y diámetro de tobera.

Las limitaciones de la técnica de Dos Colores permanecen aún abiertas tras la investigación planteada en esta tesis. El fenómeno de propagación de la radiación de la llama está directamente relacionado con el resultado obtenido. En términos de la temperatura del hollín, se ha observado que llamas con mayor contenido de hollín, como el Diesel, sesgan la temperatura hacia valores encontrados en capas más cercanas a la superficie de reacción. Además, en el análisis de las condiciones de motor evaluadas, solo el efecto térmico de aumentar la temperatura de la cámara de combustión debería impactar directamente sobre la temperatura del hollín. Sin embargo, algunas variaciones paramétricas, como la del diámetro de tobera, también han producido cambios en la temperatura obtenida mediante el método de los dos colores.

6.2. Trabajos futuros

Como se ha comentado, ni mucho menos se puede dar por cerrada la investigación en llamas Diesel desde la perspectiva experimental que se ha desarrollado. Todo lo contrario, pensamos que bajo la base experimental la evolución transitoria de llamas Diesel se puede completar con aspectos que a continuación resaltamos:

- 1.- Siendo la tasa de expansión un buen indicador macroscópico del chorro, la definición del ángulo de chorro reactivo merece un estudio sistemático para encontrar leyes de dependencia entre este y la evolución del chorro reactivo.

- 2.- Caracterización del flujo en la cámara de combustión del motor óptico, con el fin de analizar de forma detallada la interacción del chorro con el flujo de aire.
- 2.- La evolución transitoria de la penetración de chorros en reactivos se ha definido en base a condiciones operación de motor y un combustible específico. Por lo que, la extensibilidad de la descripción de las fases de penetración ha de ser probada en condiciones de combustión de baja temperatura con recirculación de gases de escape EGR y con combustibles de distinta reactividad.
- 3.- Un aspecto no tratado en este documento ha sido la relación entre el proceso de combustión y la evolución de la penetración de la llama. A partir de descripciones como las de la *Figura 6.1* se podrá establecer una relación entre la tasa de liberación de calor [3] con las fases de penetración. En la figura, lo que se muestra es liberación de calor y la evolución de penetración en el motor óptico, siendo esta última bastante incierta. Por lo que es necesario resolver el cálculo de la tasa de liberación de calor en maquetas de flujo constante y así, establecer la relación entre penetración y liberación de calor para distintas condiciones de operación, ya que en el motor óptico se ha probado en este documento una alta variabilidad de la penetración de chorros reactivos.

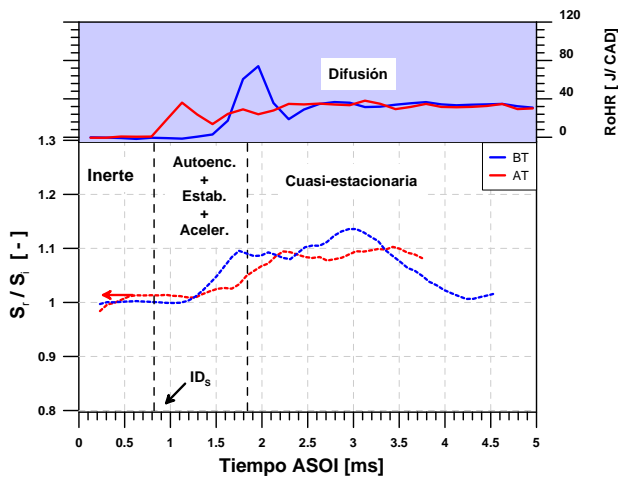


Figura 6.1.- Ejemplo de fases de penetración y tasa de liberación de calor para la variación de temperatura del aire desarrollada en el motor óptico (ver *Tabla 3.6*). $P_{iny} = 50$ MPa; Condiciones **BT** y **AT**; $\rho_{aire} = 21.2$ kg/m³ (media a lo largo de la inyección); Tobera B; Combustible: n-Heptano.

- 4.- Bajo la descripción de la evolución transitoria de chorros Diesel, el efecto de la densidad local de combustión se ha referido como elemento potenciador de la expansión radial de la llama de manera cualitativa. El uso de modelos CFD pueden aportar el enfoque cuantitativo y así poder relacionar la densidad local de los productos de combustión y la expansión radial.
- 5.- Más allá de las mejores en el entorno experimental de la termometría de Dos colores, las incertidumbres asociadas a los efectos de propagación y radiancia de llama permanecen latentes en llamas propensas a formar hollín en la superficie de reacción. Si es de interés aportar un análisis cuantitativo en este sentido, es imperante la aplicación de la técnica con medidas simultáneas de *Incandescencia Inducida por láser LII* y la *Extinción de Luz LE*. Cuantificando la radiación de llama en su sección transversal a través de *LII* y cuantificando el coeficiente de extinción en el camino óptico de la misma a través de *LE*, podrán identificarse condiciones de combustión e inyección en las que la propagación de la radiación aumenta las incertidumbre de medida con el del Método de Dos colores.

6.3.Referencias

- [1]. Pastor J. V., Payri R., García-Oliver J., Briceño F.J., “Schlieren methodology for the analysis of transient diesel flame evolution”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 6, p.p. 1661-1676, 2013.
- [2]. Lillo P., Pickett L., Persson H., Andersson, O. et al., “Diesel spray ignition detection and spatial/temporal correction”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 5(3), pp.1330-1346, 2012.
- [3]. Nerva J. G., “An assessment of fuel physical and chemical properties in the combustion of a diesel spray”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2013

Bibliografía

Arcoumanis C., Kamimoto T., “Flow and combustion in reciprocating engines. *Springer-Verlag*, 2009. **Aparece en: Cap.2**-[5], **Cap.4**-[8], **Cap.5**-[26].

Armas O., Rodríguez J., Payri F., Martín J., Agudelo J. R., “Effect of the trapped mass and its composition on the heat transfer in the compression cycle of a reciprocating engine”. *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 25, pp. 2842-2853, 2005. **Aparece en: Cap.3**-[31].

Arrègle J., Pastor J.V., Ruiz S., “The influence of injection parameters on diesel spray characteristics”. *SAE Paper* 1999-01-0200, 1999. **Aparece en: Cap.2**-[36].

Baert R., Frijters P., Somers B., Luijten C. et al., “Design and operation of a high pressure, high temperature cell for HD diesel spray diagnostics: guidelines and results”. *SAE Paper* 2009-01-0649, 2009. **Aparece en: Cap.2**-[63].

Bardi M., “Partial needle lift and injection rate shape effect on the formation and combustion of the diesel spray”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, 2014. **Aparece en: Cap.1**-[24], **Cap.2**-[52], **Cap.3**-[27], **Cap.4**-[6].

Belarte E., “Estudio del proceso de combustión premezclada controlada por la reactividad del combustible en un motor de encendido por compresión”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2015. **Aparece en: Cap.1**-[13].

Benajes J., García A., Domenech V., Durrett R., “An investigation of partially premixed compression ignition combustion using gasoline and spark assistance”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 52(2), pp. 468-477,

2013. **Aparece en: Cap.1**-[17].

Benajes J., García-Oliver J. M., Novella R., Kolodziej, C., “Increased particle emissions from early fuel injection timing diesel low temperature combustion”. *Fuel*, Vol. 94, pp. 184-190, 2012. **Aparece en: Cap.2**-[55].

Benajes J., Molina S., García J., “Influence of pre- and post-injection on the performance and pollutant emissions in a HD diesel engine”. *SAE Paper* 2001-01-0526, 2001. **Aparece en: Aparece en: Cap.1**-[6].

Benajes J., Novella R., Garcia A., Domenech V. et al., “An investigation on mixing and auto-ignition using diesel and gasoline in a direct-injection compression-ignition engine operating in PCCI combustion conditions”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 4(2), pp. 2590-2602, 2011. **Aparece en: Cap.1**-[15].

Bergthorson J., Thomson M., “A review of the combustion and emissions properties of advanced transportation biofuels and their impact on existing and future engines”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42, pp. 1393-1417, 2015. **Aparece en: Cap.1**-[9].

Bermúdez V., García J.M., Julia E., Martínez S., “Engine with optically accessible cylinder head: a research tool for injection and combustion processes”. *SAE Paper* 2003-01-1110, 2003. **Aparece en: Cap.3**-[20].

Blessing M., König G., Krüger C., Michels U. et al., “Analysis of flow and cavitation phenomena in diesel injection nozzles and its effects on spray and mixture formation”. *SAE Paper* 2003-01-1358, 2003. **Aparece en: Cap.2**-[19].

Bobba M., Musculus M., “Laser diagnostics of soot precursors in a heavy-duty diesel engine at low-temperature combustion conditions”. *Combustion and Flame*, Vol. 159, pp. 832-843, 2012. **Aparece en: Cap.2**-[84], **Cap.5**-[35].

Bosch W., “The fuel rate indicator: a new measuring instrument for display of the characteristics of individual injection”. *SAE Paper* 660749, 1966. **Aparece en: Cap.3**-[13].

Bracho G., “Experimental and theoretical study of the direct diesel injection process at low temperatures”. *Tesis doctoral*, Universidad

Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2011. **Aparece en: Cap.2-[20], Cap.3-[15].**

Bruneaux G., “Combustion structure of free and wall-impinging diesel jets by simultaneous laser-induced fluorescence of formaldehyde, poly-aromatic hydrocarbons, and hydroxides”. *Int. J. Engine Res.*, Vol. 9, pp. 249-265, 2008. **Aparece en: Cap.2-[98].**

Burke R., Brace, C., “The effects of engine thermal conditions on performance, emissions and fuel consumption”. *SAE Paper 2010-01-0802*, 2010. **Aparece en: Cap.1-[11].**

Bysveen M., Almås T., Ulvund K. A, Jørgensen A., “Development of a shadowgraph image technique describing the fuel spray behavior in a rapid compression machine”. *SAE Paper 2004-01-2934*, 2004. **Aparece en: Cap.2-[69].**

Canaan R., Dec J., Green R., Daly D., “The influence of fuel volatility on the liquid-phase fuel penetration in a Heavy-Duty D.I. diesel engine” *SAE Paper 980510*, 1998. **Aparece en: Cap.2-[47].**

David G., “Mesure de la température et de la concentration en suies de flammes diesel”. *Projet de Fin d'Étude, Institut Supérieur de l'Automobile et des Transports*, 2011. **Aparece en: Cap.5-[22].**

de la Garza O., “Estudio de los efectos de la cavitación en toberas de inyección Diesel sobre el proceso de inyección y el de formación de hollín”. *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2012. **Aparece en: Cap.3-[26].**

Dec J. E., “A conceptual model of DI diesel combustion based on laser sheet imaging”. *SAE Paper 970873*, 1997. **Aparece en: Cap.2-[92].**

Dec J. E., Canaan R. E., “PLIF imaging of NO formation in for DI diesel engine”. *SAE Paper 980147*, 1998. **Aparece en: Cap.2-[95].**

Dec J. E., Coy E. B., “Radical OH imaging in for DI diesel engine and the structure of the early diffusion flame”. *SAE Paper 960831*, 1996. **Aparece en: Cap.2-[76].**

Dec J. E., Espey C., “Chemiluminescence imaging of autoignition in for DI

diesel engine”. *SAE Paper* 982685, 1998. **Aparece en: Cap.2-**[73].

Dec J. E., Espey C., “Ignition and early soot formation in for D.I. diesel engine using multiple 2-D imaging diagnostics”. *SAE Paper* 950456, 1995. **Aparece en: Cap.2-**[72].

DELPHI. Direct acting light-duty diesel CR system. Tech. rep. *Delphi Automotive*, 2008. **Aparece en: Cap.1-**[8].

Dent J. C., “A basis for the comparison of various experimental methods for studying spray penetration”. *Transactions of the SAE*, Vol. 80, pp. 1881-1884, 1971. **Aparece en: Cap.2-**[66].

Desantes J. M., Pastor J. V., García J. M., Pastor J. M., “A 1D model for the description of mixing-controlled reacting diesel sprays”. *Combustion and Flame*, Vol. 156(1), pp. 234-249, 2009. **Aparece en: Cap.3-**[54].

Desantes J. M., Salvador F. J., Carreres T., Martínez J., “Large-eddy simulation analysis of the influence of the needle lift on the cavitation in diesel injector nozzles”. *P.I. Mech. Eng. D.*, Vol. 229, pp. 407-423, 2015. **Aparece en: Cap.2-**[22].

Desantes J., Payri R., Salvador F., de la Morena J., “Cavitation effects on spray characteristics in the near-nozzle field”. *SAE Paper* 2009-24-0037, 2009. **Aparece en: Cap.2-**[38].

Desantes, J. M., Pastor J. V., García J. M., Briceño F. J., “An experimental analysis on the evolution of the transient tip penetration in reacting Diesel sprays”. *Combustion and Flame*, Vol. 161(8), pp. 2137-2150, 2014. **Aparece en: Cap.3-**[56].

di Stasio S., Massoli P., “Influence of the soot pyrometry uncertainties in temperature and volume-fraction measurements by two-colour pyrometry”. *Meas. Sci. Technol.*, Vol.5, pp 1453-1465, 1994. **Aparece en: Cap.3-**[56].

Domenech V., “Estudio de nuevas estrategias para el control de la combustión en modos parcialmente premezclados en motores de encendido por compresión”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2013. **Aparece en: Cap.5-**[33].

Edwards C.F., Siebers D., Hoskin D.H., “A study of the autoignition process of diesel spray via high speed visualization”. *SAE Paper* 920108, 1992. **Aparece en: Cap.2-[87]**.

Espey C., Dec J. E. Litzinger T. A., Santavicca D. A., “Planar laser rayleigh scattering for quantitative vapor-fuel imaging in a diesel jet”. *Combust. Flame* 109:65, 1997. **Aparece en: Cap.2-[57]**.

Espey C., Dec J. E., “The effect of TDC temperature and density on the liquid-phase fuel penetration in a DI diesel engine”. *SAE Paper* 952456, 1995. **Aparece en: Cap.2-[43]**.

Fisher B. T, Mueller C. J. “Liquid penetration length of heptamethylnonane and trimethylpentane under unsteady in-cylinder conditions”. *Fuel*, Vol. 89, pp. 2673–2696, 2010. **Aparece en: Cap.2-[46]**.

Flynn P. F., Durrett R. P., Hunter G. L., zur Loye A. et al., “Diesel combustion: an integrated view combining laser diagnostics, chemical kinetics and empirical validation”. *SAE Paper* 1999-01-0509, 1999. **Aparece en: Cap.2-[77]**.

García A., “Estudio de los efectos de la post inyección sobre el proceso de combustión y la formación de hollín en motores Diesel”. *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2009. **Aparece en: Cap.2-[27]**.

García, J. M., “Aportaciones al estudio del proceso de combustión turbulenta de chorros en motores diesel de inyección directa”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2004. **Aparece en: Cap.1-[21], Cap.2-[1], Cap.3-[21], Cap.5-[11]**.

Gargar K., “Contribución al conocimiento del comportamiento del Biodiesel y sus mezclas en motores Diesel actuales y ante futuras tendencias”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2009. **Aparece en: Cap.1-[10]**.

Gaydon A. G., “The spectroscopy of flames”. Chapman and Hall Ltd., 1974. **Aparece en: Cap.2-[75]**.

Gimeno J., “Desarrollo y aplicación de la medida del flujo de cantidad de movimiento de un chorro Diesel”. *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2008. **Aparece en: Cap.2**-[12], **Cap.3**-[4].

Glassman I., Yetter R., Combustion, 4th Ed., Academic Press, 2008. **Aparece en: Cap.2**-[7].

Han D., Mungal M.G., “Direct measurement of entrainment in reacting/nonreacting turbulent jets”. *Combustion and Flame*, Vol. 124(3), pp. 370–386, 2001. **Aparece en: Cap.5**-[24].

Hessel, R., Reitz, R., Yue, Z., Musculus, M. et al., “Applying advanced CFD analysis tools to study differences between start-of-main and start-of-post injection flow, temperature and chemistry fields due to combustion of main-injected fuel”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 8(5), 2015, [doi:10.4271/2015-24-2436](https://doi.org/10.4271/2015-24-2436). **Aparece en: Cap.2**-[26].

Heywood J. B., Internal combustion engine fundamentals. *McGraw-Hill Publishing* 1988. **Aparece en: Cap.2**-[4].

Higgins B. S., Mueller C. J., Siebers D., “Measurements of fuel effects on liquid-phase penetration in DI sprays”. *SAE Paper* 1999-01-0519, 1999. **Aparece en: Cap.2**-[32].

Higgins B., Siebers D., “Measurement of the flame lift-off location on di diesel sprays using OH chemiluminescence”. *SAE Paper* 2001-01-0918, 2001. **Aparece en: Cap.3**-[50], **Cap.4**-[4].

Higgins B., Siebers D., Aradi A., “Diesel-spray ignition and premixed burn behaviour”. *SAE Paper* 2000-01-0940, 2000. **Aparece en: Cap.2**-[74].

Hiroyasu H., Arai M., “Structures of fuel sprays in diesel engines”. *SAE Paper* 900475, 1990. **Aparece en: Cap.2**-[39].

Hiroyasu T., Kadota T., Arai, M., “Supplementary comments: fuel spray characterization in diesel engines”. *Combustion Modeling in Reciprocating Engines*, Plenum Press, pp. 369-408, 1980. **Aparece en: Cap.2**-[64].

Hoffmann T., Hottenbach, P., Koss, H., Pauls, C. et al., “Investigation of mixture formation in diesel sprays under quiescent conditions using Raman,

Mie and LIF diagnostics”. *SAE Paper* 2008-01-0945, 2008. **Aparece en: Cap.2-[85]**.

Idicheria C. A., Pickett L. M., “Ignition, soot formation, and end-of-combustion transients in diesel combustion under high-EGR conditions”. *Int. J. Engine Res.*, Vol. 12, pp. 376-392, 2011. **Aparece en: Cap.2-[79]**.

Idicheria C., Pickett L., “Formaldehyde visualization near lift-off location in a diesel jet”. *SAE Paper* 2006-01-3434, 2006. **Aparece en: Cap.2-[78]**.

Idicheria C., Pickett L., “Quantitative mixing measurements in a vaporizing diesel spray by rayleigh imaging”. *SAE Paper* 2007-01-0647, 2007. **Aparece en: Cap.2-[69]**.

Idicheria C. Pickett L., “Soot formation in diesel combustion under high-EGR conditions”. *SAE Paper* 2005-01-3834, 2005. **Aparece en: Cap.5-[27]**.

Incropera F, DeWitt D., “Fundamentos de la transferencia de calor”. *Prentice Hall*, 1996. **Aparece en: Cap.2-[16]**.

Jerzembeck S., Petersa N., Pepiot-Desjardins P., Pitsch H., “Laminar burning velocities at high pressure for primary reference fuels and gasoline: Experimental and numerical investigation”. *Combustion and Flame*, Vol. 156 pp. 292–301, 2009. **Aparece en: Cap.5-[32]**.

Jung, Y., Manin, J., Skeen, S., and Pickett, L., “Measurement of liquid and vapor penetration of diesel sprays with a variation in spreading angle”. *SAE Paper* 2015-01-0946, 2015. **Aparece en: Cap.2-[70]**.

Kamimoto T., Murayama Y., “Re-examination of the emissivity of diesel flames”. *Int. J. Engine Res.*, Vol. 12, pp. 580-600, 2011. **Aparece en: Cap.5-[5]**.

Kastengren A. Zak, F. Powell C., Manin J., et al., “Engine Combustion Network (ECN): measurements of nozzle geometry and hydraulic behavior”. *Atomization and Sprays*, Vol. 22, pp. 1011-1052, 2012. **Aparece en: Cap.3-[9]**.

Kastengren Am Powell, C. “Spray density measurements using X-ray radiography”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Part

D: *Journal of Automobile Engineering* Vol. 221(6), pp. 653–662, 2007. **Aparece en: Cap.2-[30].**

Klein-Douwel R., Frijters P. Somers L. de Boer W., et al. “Macroscopic diesel fuel spray shadowgraphy using high speed digital imaging in a high pressure cell”. *Fuel*, Vol. 86(12-13), pp. 1994-2007, 2007. **Aparece en: Cap.2-[33].**

Knox B., Genzale C., Pickett L., Garcia-Oliver J. et al., “Combustion recession after end of injection in diesel sprays”. *SAE Int. J. Engines*, vol. 8(2), pp: 679-695, 2015. **Aparece en: Cap.2-[97], Cap.5-[17].**

Kobayashi H., Kamimoto T., Matsuoka S., “A photographic and thermodynamic study of diesel combustion in a rapid compression machine”. *SAE Paper* 810259, 1981. **Aparece en: Cap.2-[109], Cap.5-[26].**

Kokjohn, S. L., “Reactivity controlled compression ignition”, PhD Dissertation in Mechanical Engineering, University of Wisconsin-Madison, 2012. **Aparece en: Cap.1-[12].**

Kook S. Pickett L. “Liquid length and vapor penetration of conventional, Fischer–Tropsch, coal-derived, and surrogate fuel sprays at high-temperature and high-pressure ambient conditions”. *Fuel*, Vol. 93, pp. 539–548, 2012. **Aparece en: Cap.2-[48].**

Kosaka H., Aizawa T., Kamimoto T., “Two-dimensional imaging of ignition and soot formation processes in a diesel flame”. *Int. J. Engine Res.*, Vol. 6, pp. 21-42, 2005. **Aparece en: Cap.2-[99].**

Kosaka H., Drewes V. H., Catalfamo L., Aradi A. A., et al., “Two-dimensional imaging of formaldehyde formed during the ignition process of diesel fuel spray”. *SAE Paper* 2000-01-0236, 2000. **Aparece en: Cap.2-[80].**

Kuti O., Zhang W., Nishida K., Wang X. et al., “Effect of Injection Pressure on Ignition, Flame Development and Soot Formation Processes of Biodiesel Fuel Spray”. *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, Vol: 3(2), pp.1057-1070, 2010. **Aparece en: Cap.2-[90].**

Lillo P., Pickett L., Persson H., Andersson, O. et al., “Diesel spray

ignition detection and spatial/temporal correction”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 5(3), pp. 1330-1346, 2012. **Aparece en: Cap.2-[82], Cap.3-[52], Cap.6-[2]**.

Linne M., Paciaroni M., Hall T., and Parker T., “Ballistic imaging of the near field in a diesel spray”. *Experiments in Fluids*, Vol. 40(6), pp. 836–846, 2006. **Aparece en: Cap.2-[31]**.

López J. J., García-Oliver J. M., García A., Domenech V., “Gasoline effects on spray characteristics, mixing and auto-ignition processes in a CI engine under Partially Premixed Combustion conditions”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 70(1), pp. 996–1006, 2014. **Aparece en: Cap.2-[56]**.

Macián V., Bermudez V., Payri R., y Gimeno J., “New technique for determination of internal geometry of a diesel nozzle with the use of silicone methodology”, *Experimental Techniques*, Vol. 27, pp. 39–43, 2003. **Aparece en:**

Macphee A. G. Tate M., Powell C., Yue Y. et al. “X-ray imaging of shock waves generated by high-pressure fuel sprays”. *Science*, Vol. 295, pp. 1261–1263, 2002. **Aparece en: Cap.3-[3]**

Mancaruso E., Vaglieco B., “An experimental comparison of n-Heptane, RME and diesel fuel on combustion characteristics in a compression ignition engine”. *Fuel Processing Technology*, Vol. 107, pp. 44-49, 2013. **Aparece en: Cap.3-[8], Cap.5-[31]**.

Manin J., Bardi M., Pickett L., Payri R., “Boundary condition and fuel composition effects on injection processes of diesel sprays at the microscopic level”. *ILASS Europe 2013-457*, 2013. **Aparece en: Cap.3-[17]**.

Marciniak, B., Wysocki M., “Discrimination between electronic and optical blooming in an insb focal-plane array under high-intensity excitation”. *Infrared Physics & Technology*, Vol. 51(3), pp. 137-145, 2008. **Aparece en: Cap.3-[38]**.

Matsui Y., Kamimoto T., and Matsuoka S., “A study on the application of the two-color method to the measurement of flame temperature and soot concentration in diesel engines”. *SAE Paper 800970*, 1980. **Aparece en: Cap.2-[103]**.

Matsui Y., Kamimoto T., Matsuoka S., “A study on the time and space resolved measurement of flame temperature and soot concentration in a DI diesel engine by the two-color method”. *SAE Paper 790491*, 1979. **Aparece en: Cap.5-[3]**.

Meijer M., Galle J., Somers L. M. T., Griensven J., Verhelst S. “High-speed characterization of ECN spray A using various diagnostic techniques”. *SAE Paper 2013-01-1616*, 2013. **Aparece en: Cap.3-[12]**.

Meijer M., Malbec L. M., Bruneaux G., Somers L. M. T., “Engine Combustion Network: Spray A basic measurements and advanced diagnostics”. *ICLASS*, 2012. **Aparece en: Aparece en: Cap.2-[96]**.

Meijer M., Somers B., Johnson J., Naber J., et al. “Engine Combustion Network (ECN): characterization and comparison of boundary conditions for different combustion vessels”. *Atomization and sprays*, Vol. 22 (9), pp. 777-806, 2012. **Aparece en: Cap.3-[28], Cap.4-[14]**.

Molina S., Salvador F. J., Carreres M., Jaramillo D., “A computational investigation on the influence of the use of elliptical orifices on the inner nozzle flow and cavitation development in diesel injector nozzles”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 79, pp. 114-127, 2014. **Cap.2-[23]**.

Molina S.A., “Estudio de la influencia de los parámetros de inyección y la recirculación de gases de escape sobre el proceso de combustión, las prestaciones y las emisiones de un motor Diesel de 1.8 litros de cilindrada”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2003. **Aparece en: Cap.2-[91]**.

Monin, C., “Caracterización del proceso de formación de hollín en una llama de difusión Diesel de baja temperatura”. *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2009. **Aparece en: Cap.3-[25]**.

Musculus M. P. B., Lachaux T., Pickett L.M., Idicheria C., “End-of-injection over-mixing and unburned hydrocarbon emissions in low-temperature-combustion diesel engines”. *SAE Paper 2007-01-0907*, 2007. **Aparece en: Cap.2-[11], Cap.5-[16]**.

Musculus M., “Multiple Simultaneous Optical Diagnostic Imaging of

Early-Injection Low-Temperature Combustion in a Heavy-Duty Diesel Engine”. *SAE Paper* 2006-01-0079, 2006. **Aparece en: Cap.2-[86].**

Musculus M., Kattke K., “Entrainment waves in diesel jets”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 2(1), pp. 1170-1193, 2009. **Aparece en: Cap.2-[50], Cap.3-[59], Cap.4-[21].**

Musculus M., Miles P., Pickett L., “Conceptual models for partially premixed low-temperature diesel combustion”. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 39, pp. 246-283, 2013. **Aparece en: Cap.1-[16]**

Musculus M., Pickett L., “Diagnostic considerations for optical laser-extinction measurements of soot in high-pressure transient combustion environments”. *Combustion and Flame*, Vol. 141(4), pp. 371-391, 2005. **Aparece en: Cap.2-[101], Cap.5-[36].**

Musculus M., Singh S., Reitz R., “Gradient effects on two-color soot optical pyrometry in a heavy-duty DI diesel engine”. *Combustion and Flame*, Vol. 153(1-2), pp. 216-227, 2008. **Aparece en: Cap.2-[107].**

Naber J. Siebers D., “Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays”. *SAE Paper* 960034, 1996. **Aparece en: Cap.2-[60], Cap.3-[43].**

Nerva J. G “An assessment of fuel physical and chemical properties in the combustion of a Diesel spray”. *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2013. **Aparece en: Cap.1-[23], Cap.2-[3], Cap.3-[5], Cap.5-[9].**

Nerva J., Yamaguchi T., Iguma H., Nishigai H. et al., “Transmission electron microscopy of soot particles sampled directly from a biodiesel spray flame”. *SAE Paper* 2011-01-2046, 2011. **Aparece en: Cap.5-[25].**

Novella R. “Estudio de la influencia de los ciclos Atkinson y Miller sobre el proceso de combustión y las emisiones contaminantes en un motor Diesel”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2009. **Aparece en: Cap.1-[18], Cap.2-[2].**

O'Connor, J. Musculus M., “In-cylinder mechanisms of soot reduction by close-coupled post-injections as revealed by imaging of soot luminosity and

planar laser-induced soot incandescence in a heavy-duty diesel engine”. *SAE Int. J. Engines*, Vol: 7(2), pp. 673-693, 2014. **Aparece en: Cap.1-[7], Cap.2-[25]**.

Pastor J. V., García-Oliver J. M., Novella R., Vera-Tudela W., “Investigation on ignition and combustion characteristics of primary reference fuels under diesel engine conditions”. *DER ARBEITSPROZESS DES VERBRENNUNGSMOTORS*, pp. 378.393, 2013. **Aparece en: Cap.3-[41]**.

Pastor J. V., Arrègle J., Palomares A., “Diesel spray image segmentation with a likelihood ratio test”. *Applied Optics*, Vol. 40, pp. 1-10, 2001. **Aparece en: Cap.3-[32]**.

Pastor J. V., López J. J., García J. M., Pastor J. M. “A 1D model for the description of mixing-controlled inert diesel sprays”. *Fuel*, Vol. 87(13-14), pp. 2871-2885, 2008. **Aparece en: Cap.2-[54], Cap.3-[53], Cap.5-[24]**.

Pastor J. V., Arrègle J., García J. M., Zapata L. D., “Segmentation of diesel sprays images with loglikelihood ratio test algorithm for non-Gaussian distributions”. *Appl. Opt.*, Vol 46, pp. 888-899, 2007. **Aparece en: Cap.5-[20]**.

Pastor J. V., Pastor J. M., Gimeno J., Nerva J.-G., “The effect of Biodiesel fuel blend rate on the Liquid-phase fuel penetration in diesel engine conditions”. *SAE Paper* 2009-24-0051, 2009. **Aparece en: Cap.2-[45], Cap.3-[34], Cap.4-[18]**.

Pastor J. V., Payri R., García-Oliver J. M., Briceño F. J. “Analysis of transient liquid and vapor phase penetration for diesel sprays under variable injection conditions”. *Atomization and Sprays*, Vol. 21(6), pp. 503–520, 2011. **Aparece en: Cap.2-[51], Cap.3-[23], Cap.5-[23]**.

Pastor J. V., Payri R., García J. M., Briceño F. J., “Schlieren methodology for the analysis of transient diesel flame evolution”. *SAE Int. J. Eng.*, Vol. 6(3), pp. 1661–1676, 2013. **Aparece en: Cap.3-[37], Cap.4-[22], Cap.6-[1]**.

Pastor J. V., Payri R., Gimeno J., Nerva J.-G., “Experimental study on RME blends: Liquid-phase fuel penetration, chemiluminescence, and soot luminosity in diesel-like conditions”. *Energy Fuels*, Vol. 23, pp. 5899-915,

2009. **Aparece en: Cap.3**-[10], **Cap.5**-[19].

Pastor J., García J. M., Pastor J., Buitrago J., “Analysis methodology of diesel combustion by using flame luminosity, two-colour method and laser-induced incandescence”. *SAE Paper* 2005-24-012, 2005. **Aparece en: Cap.2**-[105], **Cap.5**-[8].

Pastor, J., Payri, R., Garcia-Oliver, J., Nerva, J., “Schlieren measurements of the ECN-Spray A penetration under inert and reacting conditions,”. *SAE Paper* 2012-01-0456, 2012. **Aparece en: Cap.2**-[62], **Cap.3**-[39], **Cap.4**-[23].

Payri F., Desantes J. M., Motores de combustión interna alternativos. 1era edición Editorial Revertè, 2011. **Aparece en: Cap.1**-[1], **Cap.2**-[6].

Payri F., Bermúdez V., Payri R., Salvador F.J., “The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles”. *Fuel*, Vol. 83, pp. 419-31, 2004. **Aparece en: Cap.2**-[15].

Payri F., Lopez J., Pla B., Graciano Bustamante, D., “Assessing the limits of downsizing in diesel engines”. *SAE Paper* 2014-32-0128, 2014. **Aparece en: Cap.1**-[2].

Payri F., Molina S., Martín J., Armas O., “Influence of measurement errors and estimated parameters on combustion diagnosis”. *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 26, pp. 226-236, 2006. **Aparece en: Cap.3**-[30].

Payri F., Pastor J. V., García J. M., Pastor J. M. “Contribution to the application of two-colour imaging to diesel combustion”. *Meas Sci. Technol.*, Vol (18), pp. 2579-2598, 2007. **Aparece en: Cap.2**-[104], **Cap.5**-[10].

Payri R., García J. M., Salvador F. J., Gimeno J., “Using spray momentum flux measurements to understand the influence of diesel nozzle geometry on spray characteristics”. *Fuel*, Vol. 84, pp. 551-61, 2005. **Aparece en: Cap.2**-[13], **Cap.3**-[19].

Payri R., García-Oliver J. M., Bardi M., Manin J., “Fuel temperature influence on diesel sprays in inert and reacting conditions”. *Appl. Therm. Eng.*, Vol. 35, p.p. 185-195, 2012. **Aparece en: Cap.3**-[60].

Payri R., Gimeno J., Bardi M., Plazas A., “Study liquid length penetration results obtained with a direct acting piezo electric injector”. *Applied Energy*, Vol. 106, pp. 152–162, 2012. **Aparece en: Cap.2-[21].**

Payri R., Salvador F. J., Gimeno J. de la Morena J. “Influence of injector technology on injection and combustion development - part 2: combustion analysis”. *Applied Energy*, Vol. 88(4), pp. 1130-1139, 2011. **Aparece en: Cap.3-[23].**

Payri R., Salvador F. J., Gimeno J., Bracho G. “The effect of temperature and pressure on thermodynamics properties of diesel and biodiesel fuels”. **Aparece en: Cap.3-[18].**

Payri R., Salvador F.J., Gimeno J., Venegas O., “Study of cavitation phenomenon using different fuels in a transparent nozzle by hydraulic characterization and visualization”. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 235–244, 2013. **Aparece en: Cap.2-[18].**

Payri R., Salvador F.J., Gimeno J., Bracho G., “A new methodology for correcting the signal cumulative phenomenon on injection rate measurements”. *Experimental Techniques*, Vol. 32, pp. 46-49, 2008. **Aparece en: Cap.3-[14].**

Payri, R., Salvador F. J., Marti-Aldaravi P., Martínez-López. J., “Using one-dimensional modeling to analyze the influence of the use of biodiesels on the dynamic behavior of solenoid-operated injectors in common rail systems: Detailed injection system model”. *Energy Conversion*, Vol. 54(1), pp. 90–99, 2012. **Aparece en: Cap.3-[16].**

Peters N., *Turbulent Combustion*, Cambridge University Press, 2000. **Aparece en: Cap.2-[93], Cap.4-[1].**

Pickett L., Genzale C., Bruneaux G., Malbec L. et al., “Comparison of diesel spray combustion in different high-temperature, high-pressure facilities”, *SAE Int. J. Engines*, Vol. 3(2), pp.156-181, 2010. **Aparece en: Cap.3-[42].**

Pickett L., Hoogterp L., “Fundamental spray and combustion measurements of JP-8 at diesel conditions”. *SAE Int. J. Commer. Veh.*, Vol. 1(1), pp.108-118, 2009. **Aparece en: Cap.2-[61], Cap.3-[44].**

Pickett L., Kook S., Williams T., “Transient liquid penetration of early-injection diesel sprays”. *SAE Paper* 2009-01-0839, 2009. **Aparece en: Cap.2-[44], Cap.3-[46].**

Pickett L., Kook S., Williams T., “Visualization of diesel spray penetration, cool-flame, ignition, high-temperature combustion, and soot formation using high-speed imaging”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 2(1), pp. 439-459, 2009. **Aparece en: Cap.3-[45], Cap.4-[9].**

Pickett L., Manin J., Genzale C., Siebers D. et al., “Relationship between diesel fuel spray vapor penetration/dispersion and local fuel mixture fraction”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 4(1), pp. 764-799, 2011. **Aparece en: Cap.2-[49], Cap.3-[55], Cap.4-[17].**

Pickett L., Manin J., Kastengren A., Powell C., “Comparison of near-field structure and growth of a diesel spray using light-based optical microscopy and X-ray radiography”. *SAE Int. J. Engines*, Vol. 7(2), pp.1044-1053, 2014. **Aparece en: Cap.2-[37].**

Pickett L., Siebers D., “Soot in diesel fuel jets: effects of ambient temperature, ambient density, and injection pressure”. *Combustion and Flame*, Vol. 138, pp. 114–135, 2004. **Aparece en: Cap.2-[89], Cap.3-[6].**

Pickett L., Siebers D., Idicheria C., “Relationship between ignition processes and the lift-off length of diesel fuel jets”, *SAE Paper* 2005-01-3843, 2005. **Aparece en: Cap.2-[83], Cap.3-[48], Cap.4-[2], Cap.5-[30].**

Pickett L.M., Kook S., Williams T., “Visualization of diesel spray penetration, cool- flame, ignition, high-temperature combustion, and soot formation using high- speed imaging”. *SAE Paper* 2009-01-0658, 2009. **Aparece en: Cap.2-[81].**

Pickett L.M., Siebers D.L., “Soot formation in diesel fuel jets near the lift-off length”. *Int. J. Engine Res.*, Vol. 7, pp. 103-130, 2006. **Aparece en: Cap.2-[100], Cap.5-[7].**

Reitz R. D., Bracco F. B., “On the dependence of spray angle and other spray parameters on nozzle design and operating conditions”. *SAE Paper* 790494, 1979. **Aparece en: Cap.2-[68].**

Reitz R. D., Bracco F. V., “Mechanism of atomization of a liquid jet”. *Phys. Fluids*, Vol. 25, pp. 1730-1742, 1982. **Aparece en: Cap.2-[34]**.

Reitz R.D., Bracco F.V., “Mechanisms of breakup of round liquid Jets”. *The Encyclopedia of Fluid Mechanics*, Vol. 3, Chapter 10, pp. 233-249, 1986. **Aparece en: Cap.2-[35]**.

Salvador F. J., “Estudio teórico experimental de la influencia de la geometría de toberas de inyección Diesel sobre las características del flujo interno y del chorro. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2003. **Aparece en: Cap.2-[14]**.

Schulz C., Gronki J., Andersson S., “Multi-species laser-based imaging measurements in a diesel spray”. *SAE Paper* 2004-01-1917, 2004. **Aparece en: Cap.2-[58]**.

Settles G.S., Schlieren and shadowgraph techniques, Springer-Verlag, 2001. **Aparece en: Cap.2-[17], Cap.3-[36]**.

Siebers D., “Liquid-phase fuel penetration in diesel sprays”. *SAE Paper* 980809, 1998. **Aparece en: Cap.2-[41], Cap.3-[57]**.

Siebers D., “Scaling liquid-phase fuel penetration in diesel sprays based on mixing-limited vaporization”. *SAE Paper* 1999-01-0528, 1999. **Cap.2-[42], Cap.3-[58]**.

Siebers D., Higgins B., “Flame lift-off on direct-injection diesel sprays under quiescent conditions”. *SAE Paper* 2001-01-0530, 2001. **Aparece en: Cap.3-[51], Cap.4-[5], Cap.5-[29]**.

Siebers D., Higgins B., Pickett, L., “Flame lift-off on direct-injection diesel fuel jets: oxygen concentration effects”. *SAE Paper* 2002-01-0890, 2002. **Aparece en: Cap.3-[47], Cap.4-[3]**.

Siebers D., “Recent developments on diesel fuel jets under quiescent conditions”. *Flow and Combustion in Reciprocating Engines*, Springer, capítulo 5, pp. 306-357, 2009. **Aparece en: Cap.4-[8], Cap.5-[34]**.

Singh S., Reitz R., Musculus M., “2-Color thermometry experiments and high-speed imaging of multi-mode diesel engine combustion”. *SAE Paper*

2005-01-3842, 2005. **Aparece en: Cap.2-[106], Cap.5-[6].**

Sjöberg M. Dec, J., “Combined effects of fuel-type and engine speed on intake temperature requirements and completeness of bulk-gas reactions for HCCI combustion”. *SAE Paper* 2003-01-3173, 2003. **Aparece en: Cap.1-[14].**

Soare V.T., “Phase doppler measurements in diesel dense sprays: Optimization of measurements and study of the orifice geometry influence over the spray at microscopic level”. *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2007. **Aparece en: Cap.2-[40].**

Solbrig C. E., Litzinger T.A., “The effect of intake charge temperature on combustion and emissions in an optically accessible di diesel engine with and without swirl”. *SAE Paper* 902060, 1990. **Aparece en: Cap.2-[88].**

Stone, R., “Introduction to internal combustion engines”. PALGRAVE MACMILLAN, 3rd Edition, 1999. **Aparece en: Cap.3-[7].**

Takeda Y., Keiichi N., Keiichi N., “Emission characteristics of premixed lean diesel combustion with extremely early staged fuel injection”. *SAE Paper* 961163, 1996. **Aparece en: Cap.5-[4].**

Thompson G., Carder D., Besch M., Thiruvengadam A., et al., “In-use emissions testing of light-duty diesel vehicles in the United States”. *Center for Alternative Fuels, Engines & Emissions West Virginia University*, Final Report, 2014. **Aparece en: Cap.1-[5].**

Tree D. R., Svensson K. I., “Soot processes in compression ignition engines”. *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 33, pp. 272-309, 2007. **Aparece en: Cap.2-[24].**

Turns S.R., An introduction to combustion, 2nd Edition., McGraw-Hill Publishing, 2000. **Aparece en: Cap.2-[8].**

Varde K., Popa D., Varde L., “Spray angle and atomization in diesel sprays”. *Transactions of the SAE*, Vol. 93(4), pp. 779-787, 1984. **Aparece en: Cap.2-[67].**

Yue Y., Powell C. F., Poola R., Wang J. et al., “Quantitative

measurements of diesel fuel spray characteristics in the near-nozzle region using X-ray absorption”. *Atomization and sprays*, Vol 11(4), pp. 471-490, 2001. **Aparece en: Cap.2-[28]**.

Zapata D., “Caracterización de los procesos de inyección-combustión diesel mediante visualización y procesado digital de imágenes”. *Tesis doctoral*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, 2010. **Aparece en: Cap.1-[22], Cap.3-[110], Cap.4-[24]**.

Zha K., Yu X., Jansons M., “Simultaneous high-speed two-color thermometry and laser-induced incandescence soot measurement in a small-bore optical engine fueled with JP-8”. *ASME 2012 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, ICEF2012-92100, pp. 313-326, 2012. **Aparece en: Cap.2-[108]**.

Zhanga J., Jinga W., Roberts W. L., Fang T., “Soot temperature and KL factor for biodiesel and diesel spray combustion in a constant volume combustion chamber”. *Applied Energy*, Vol. 107, pp. 52-65, 2013. **Aparece en: Cap.5-[12]**.

Zhao H. Ladommatos, “Optical diagnostics for soot and temperature measurement in diesel engines”. *Prog. Energy Combust. Sci.*, Vol. 24, pp. 221-255, 1998. **Aparece en: Cap.2-[102], Cap.5-[1]**.