

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
DEPARTAMENTO DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS



Caracterización de los Procesos de Inyección-
Combustión Diesel Mediante Visualización y
Procesado Digital de Imágenes

TESIS DOCTORAL

Realizada por:

D. Luis Daniel Zapata Pemberthy

Dirigida por:

Dr. D. José Vicente Pastor Soriano

Valencia, Abril de 2010

TESIS DOCTORAL

Caracterización de los Procesos de Inyección- Combustión Diesel Mediante Visualización y Procesado Digital de Imágenes

Realizada por: D. Luis Daniel Zapata Pemberthy
Dirigida por: Dr. D. José Vicente Pastor Soriano

TRIBUNAL CALIFICADOR:

Presidente: Dr. D. Jesús Benajes Calvo
Secretario: Dr. D. José María García Oliver
Vocales: Dr. D. Octavio Armas Vergel
Dr. D. Andrés Melgar Bachiller
Dr. D. José Enrique Juliá Bolívar

Vocales suplentes:

Dr. D. Magín Lapuerta Amigó
Dr. D. Francisco Tinaut Fluixá

Valencia, Abril de 2010

Resumen

El objetivo de esta tesis doctoral ha sido el desarrollo de metodologías completas para la caracterización experimental de los procesos de inyección de combustible, evaporación y formación de mezcla, autoencendido y combustión en toberas reales de múltiples orificios de motores Diesel. Para el logro del objetivo se han implementado diferentes técnicas de visualización y se han desarrollado los algoritmos para el procesado automático de las imágenes.

El estudio de visualización del chorro líquido, en instalaciones experimentales de uno o más accesos ópticos amplios, se ha centrado en el análisis del efecto de la configuración opto-electrónica sobre la calidad de las imágenes, y se han diseñado y evaluado nuevos algoritmos de procesado. Como aportación innovadora se ha generalizado el algoritmo de segmentación LRT para el caso de distribuciones no normales.

Para el estudio de la evaporación de chorros, reactivos o inertes, se implementaron las técnicas de Schlieren y Shadowgraph en dos variantes básicas según la disponibilidad de accesos: método de transmisión y método de doble paso. Se realizó un estudio teórico-experimental completo, con la finalidad de precisar las variables que afectan la sensibilidad e identificar las principales fuentes de error en el análisis de las imágenes. Los algoritmos propuestos toman como base los de segmentación de chorro líquido con pequeñas modificaciones en el cálculo del nivel digital umbral.

El estudio del autoencendido y combustión se llevó a cabo mediante el registro de la emisión natural de quimioluminiscencia de los radicales CH y OH y de la radiación térmica del hollín. Se analiza en detalle la sensibilidad del método de visualización a la configuración del instrumental de adquisición y se plantea una metodología de análisis de imágenes basada en el estudio estadístico de las distribuciones espaciales de intensidad.

Abstract

The objective of this doctoral thesis has been the development of complete methodologies for the experimental characterization of the processes of fuel injection, vaporization and mixture formation, autoignition and combustion in real multi-orifice nozzles for Diesel engines. Different visualization techniques have been implemented to achieve this objective, and algorithms for automatic image processing have been developed.

The study of liquid spray visualization, in experimental facilities with one or more wide optical accesses, has focused on the analysis of the effect of the opto-electronic configuration upon the image quality, and new processing algorithms have been designed and evaluated. As an innovative contribution, the LRT segmentation algorithm has been generalized to non-Gaussian distributions.

Schlieren and Shadowgraph techniques have been implemented for the study of vaporizing sprays making use of two basic variants, according to the availability of optical accesses: transmission method and double-pass method. A complete theoretical-experimental study has been carried out, with the aim of defining the variables that affect the sensitivity of the method, and to identify error sources in the image analysis. Proposed algorithms are based upon the liquid spray segmentation ones, with small modifications for the calculation of the threshold digital level.

The study of autoignition and combustion has been carried out by means of the recording of natural chemiluminescence emission of CH and OH radicals, as well as of the soot thermal radiation. The sensitivity of the visualization method to the acquisition equipment configuration has been analysed in detail, and an image analysis methodology based upon the statistical study of spatial intensity distribution has been presented.

Resum

L'objectiu d'aquesta tesi doctoral ha sigut el desenvolupament de metodologies completes per a la caracterització experimental dels processos d'injecció de combustible, evaporació i formació de mescla, autoencesesa i combustió en tovers reals de múltiples orificis en motors Diesel. Per a aconseguir aquest objectiu s'han implementat diferents tècniques de visualització i s'han desenvolupat algoritmes per al processat automàtic de les imatges.

L'estudi de visualització del doll líquid, en instal·lacions experimentals d'un o més accessos òptics amplis, s'ha centrat en l'anàlisi de l'efecte de la configuració opto-electrònica sobre la qualitat de les imatges, i s'han dissenyat i avaluat nous algoritmes de processat. Com aportació innovadora s'ha generalitzat l'algoritme de segmentació LRT per al cas de distribucions no normals.

Per a l'estudi de l'evaporació de dolls, reactius o inerts, s'han implementat les tècniques de Schlieren i Shadowgraph en dues variants bàsiques segons la disponibilitat d'accessos: mètode de transmissió i mètode de doble pas. Es va realitzar un estudi teòric-experimental complet, amb la finalitat de precisar les variables que afecten la sensibilitat i identificar les principals fonts d'error a l'anàlisi de les imatges. Els algoritmes proposats tenen com a base els de segmentació de doll líquid amb xicotetes modificacions al càlcul del nivell digital llindar.

L'estudi de l'autoencesesa i combustió es va dur a terme mitjançant el registre de l'emissió natural de quimioluminescència dels radicals CH i OH i de la radiació tèrmica del sutge. S'analitza la sensibilitat del mètode de visualització a la configuració de l'instrumental d'adquisició, i es planteja una metodologia d'anàlisi de les imatges basada en l'estudi estadístic de les distribucions espacials d'intensitat.

A mi familia

Agradecimientos

La realización de este trabajo de tesis ha sido posible gracias a la colaboración de muchas personas a quienes me gustaría expresar mi agradecimiento.

En primer lugar quisiera agradecer a los responsables del CMT-Motores Térmicos, Francisco Payri y José María Desantes, la oportunidad que me brindaron de incorporarme a su grupo. En especial, quiero mencionar a mi director de Tesis, José Vicente Pastor, por su dirección y por todo lo que de él he podido aprender.

Quiero agradecer a los integrantes del Grupo de Técnicas Ópticas, Quique, Jorge, Loïc, Chiara, Gustavo, Jean..., por los buenos y, en ocasiones, no tan buenos momentos vividos; así como a quienes realizaron su proyecto final de carrera conmigo: Ginés, Inma, Manu y Julián. Igualmente, nombrar a quienes compartieron su tiempo ayudándome a organizar ideas: Xemary, Carlos, Elena, Josevi, Jose Manuel... y quienes colaboraron con el cierre y tramitación del documento: Mariany y Antonio García.

Quiero igualmente dirigir mi gratitud a todos aquellos miembros de los grupos de inyección y combustión con quienes tuve la enorme suerte de poder trabajar: Jean Arrègle, Raul Payri, Javi Salvador, Jaime Jimeno, Javi López, Sjoerd, Ricardo, Korneel, Carlos...

Adicionalmente, reconocer el trabajo de los técnicos de las instalaciones ópticas con quienes compartí la dura tarea del trabajo de laboratorio, Carlos, José Enrique, Dani..., y a José por el trabajo de taller. A los integrantes del grupo de control y electrónica y al personal de informática por la difícil labor de mantener siempre todo el equipo de medida en las mejores condiciones.

Y como olvidar al personal de secretaría con su amabilidad y disponibilidad en la realización de todos los tramites administrativos y a Antonio Torregrosa por su colaboración en la búsqueda del material bibliográfico.

Gracias a toda la gente que en esta larga travesía he tenido la oportunidad de conocer tanto dentro como fuera del departamento.

Por último, quisiera agradecer a mi familia todo su apoyo, especialmente a mi madre por nuestra formación y a Sandra por sus palabras de motivación.

Esta tesis ha sido posible gracias a la financiación de la Conselleria de Empresa, Universitat y Ciencia de la Generalitat Valenciana, como parte de las becas para la Formación de Personal Investigador (FPI).

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación del estudio	3
1.2. Objetivos y metodología	5
1.3. Estructura del documento	7
Bibliografía	9
2. Los procesos de inyección y combustión en motores Diesel	11
2.1. Introducción	13
2.2. Fases del proceso	13
2.3. Formación del chorro Diesel	15
2.3.1. Fenómenos físicos	16
2.3.1.1. Flujo interno	16
2.3.1.2. Atomización y coalescencia	17
2.3.1.3. Evaporación y mezcla	18
2.3.2. Caracterización	19
2.3.2.1. Caracterización hidráulica de toberas	20
2.3.2.2. Caracterización macroscópica del chorro	20
2.3.2.3. Características de la dinámica interna del chorro	22
2.4. Combustión del chorro Diesel	24
2.4.1. Fenómenos físico-químicos	24
2.4.1.1. Autoencendido	24
2.4.1.2. Combustión de premezcla	25

2.4.1.3.	Combustión por difusión	26
2.4.2.	Caracterización	27
2.4.2.1.	Tiempos característicos	27
2.4.2.2.	Distribución de la temperatura y concentra- ción de productos	29
2.4.2.3.	Longitud de Lift-Off	30
2.5.	Resumen	30
	Bibliografía	33
3.	Visualización de los procesos de inyección y combustión	39
3.1.	Introducción	41
3.2.	Técnicas de visualización en MCIA	42
3.2.1.	Visualización de la formación del chorro	43
3.2.2.	Visualización de la combustión	47
3.3.	Sistemas de medida	50
3.3.1.	Sistemas de adquisición	51
3.3.1.1.	Fotorreceptores puntuales	52
3.3.1.2.	Cámaras digitales	53
3.3.2.	Sistemas de iluminación	57
3.3.3.	Sistemas de sincronización	60
3.4.	Instalaciones experimentales	61
3.4.1.	Maquetas de inyección y motores ópticos	61
3.4.2.	Maquetas isotermas de SF ₆ y N ₂	64
3.4.3.	Motor-maqueta	65
3.4.4.	Motor óptico transparente	68
3.5.	Análisis de imágenes del chorro Diesel	69
3.5.1.	Procesado digital de imágenes	69
3.5.2.	Algoritmos de segmentación de chorro Diesel	73
3.6.	Resumen	75
	Bibliografía	78

4. Visualización del chorro líquido	89
4.1. Introducción	91
4.2. Configuración para la visualización de chorro líquido	91
4.2.1. Visualización con múltiples accesos	92
4.2.2. Visualización con acceso único	97
4.3. Procesado de imágenes de chorro libre isoterma	100
4.3.1. Pre-procesado de las imágenes	101
4.3.1.1. Inicio y lectura	101
4.3.1.2. Reconstrucción del color	102
4.3.1.3. Sustracción de fondo	104
4.3.1.4. Pre-segmentación y cálculo de los histogramas	104
4.3.2. Segmentación	106
4.3.2.1. Algoritmo LRT	107
4.3.2.2. Estimación estadística	109
4.3.2.3. Cálculo del umbral a priori y estimación de la PDF _S	116
4.3.2.4. Segmentación con el algoritmo 1D-LRT	118
4.3.2.5. Imágenes con información del color	122
4.3.3. Post-procesado	123
4.3.3.1. Eliminación de ruido y determinación del contorno	124
4.3.3.2. Post-procesado para la validación subjetiva de la calidad de la segmentación	126
4.3.3.3. Caracterización geométrica del chorro	129
4.3.3.4. Tratamiento estadístico de datos	131
4.4. Análisis de la robustez de los algoritmos	134
4.4.1. Configuración de la iluminación	134
4.4.2. Variación de la apertura del diafragma	137
4.5. Resumen y conclusiones	141
Bibliografía	145

5. Schlieren y Shadowgraph en el estudio del chorro Diesel	147
5.1. Introducción	149
5.2. Fundamentos de las técnicas	150
5.2.1. Propagación de la luz en medios heterogéneos	151
5.2.2. Técnicas de Schlieren y Shadowgraph	153
5.2.3. Factores que afectan la sensibilidad	156
5.2.3.1. Tipo de iluminación	157
5.2.3.2. Tamaño finito de la fuente	158
5.2.3.3. Filtrado espacial	160
5.2.3.4. Lentes y espejos	163
5.2.3.5. Sensores	165
5.3. Aplicación al estudio del chorro Diesel	165
5.3.1. Introducción	165
5.3.2. Estudios preliminares	168
5.3.2.1. Instrumental	168
5.3.2.2. Procedimiento de alineación y enfoque	174
5.3.3. Estudios en la configuración de transmisión	176
5.3.3.1. Visualización de ondas de presión	177
5.3.3.2. Chorro evaporativo	182
5.3.4. Estudios en la configuración de doble paso	191
5.4. Procesado de las imágenes	206
5.4.1. Características de los histogramas	207
5.4.2. Pre-procesado	211
5.4.2.1. Pre-segmentación y cálculo de histogramas	211
5.4.2.2. Homogenización del fondo	212
5.4.3. Segmentación: adaptación del algoritmo 1D-LRT	215
5.4.4. Post-procesado	218
5.5. Resumen y conclusiones	219
Bibliografía	223

6. Visualización de los procesos de combustión Diesel	227
6.1. Introducción	229
6.2. Metodología de visualización	230
6.2.1. Emisión de radiación natural	230
6.2.2. Configuración para la visualización de la combustión . .	231
6.2.3. Análisis de sensibilidad del método de visualización . .	236
6.3. Procesado de las imágenes	247
6.3.1. Algoritmos de procesado	249
6.4. Resumen y conclusiones	256
Bibliografía	258
7. Conclusiones y desarrollos futuros	261
7.1. Conclusiones	263
7.2. Desarrollos futuros	271
Bibliografía	275

Tabla de símbolos

Latinos

A	Area
a	Velocidad del sonido
a, a'	Distancia al objeto y a la imagen de un sistema de lentes
B	Componente matricial azul del espacio de color RGB
$b(x, y)$	Nivel digital del píxel de coordenadas (x, y) de la matriz azul
$BS(50/50)$	Lámina semitransparente con $T = 50\%$
C	Número de clases del sistema de clasificación
c	Velocidad del frente del chorro
d	Diámetro
e	Espesor
f	Distancia focal
f_B	Imagen sin chorros
f_{S_o}	Imagen con chorros original
f_{S_r}	Imagen con chorros resultante
$f(x, y)$	Nivel digital del píxel de coordenadas (x, y)
$f/\#, \mathbf{F}$	Apertura relativa
G	Componente matricial verde del espacio de color RGB
	Ganancia del intensificador
$g(x, y)$	Nivel digital del píxel de coordenadas (x, y) de la matriz verde
I	Intensidad de radiación
k	Factor de estimación experimental del umbral a priori
KL	Factor de cantidad de hollín
L	Longitud característica
	Recorrido óptico
LL_{max}	Longitud líquida máxima

$\ell(x)$	Función de máxima verosimilitud
M	Número de columnas de la matriz de píxeles
	Peso molecular del gas
m	Masa
\dot{M}	Flujo de cantidad de movimiento
\dot{m}	Gasto másico
N	Número de filas de la matriz de píxeles
n	Índice de refracción
	Número de chorros de la tobera
	Dimensionalidad del sistema de clasificación
OD	Densidad óptica (<i>Optical Density</i>)
P	Presión
P_i	Probabilidad a priori de ω_i
$p(x)$	Función de probabilidad incondicional de la mezcla
$pc(x)$	Valor de frecuencia del nivel digital (x)
$p_i(x)$	Función condicional de ω_i
R	Componente matricial rojo del espacio de color RGB
	Constante universal de los gases
$r(x, y)$	Nivel digital del píxel de coordenadas (x, y) de la matriz roja
r	Componente radial
rm	Distancia radial de máxima intensidad luminosa
r_{max}	Distancia radial máxima de las combustión
r_{min}	Distancia radial mínima de las combustión
R^2	Variable estadística que indica el ajuste de datos
T	Temperatura
	Umbral óptimo de selección
T_{ap}	Umbral de selección a priori
T_{soot}	Temperatura de las partículas de hollín incandescente
x	Muestra del sistema de clasificación
y, y'	Dimensiones del objeto y la imagen de un sistema de lentes

Griegos

α	Factor de forma de la PDF gamma Angulo del chorro Semi-ángulo del cono formado por las ondas de presión del chorro supersónico
β	Angulo de descentrado de la configuración de doble paso Angulo entre el chorro y el soporte del inyector
$\Gamma(x)$	Función gamma
γ	Valor de corrección de LUT tipo gamma ($0 < \gamma < 1$) Coeficiente adiabático
Δ	Gradiente
ΔI	Gradientes de intensidad
δ	Angulo de inclinación de las fibras de iluminación
ε	Error de estimación de Bayes Angulo refractado
θ	Factor de escala de la PDF gamma Componente angular de las coordenadas polares
λ	Longitud de onda electromagnética
μ	Media de la PDF
π	pi, 3.1415926
ρ	Densidad
σ	Desviación de la PDF
T	Transmitancia óptica
τ	Tiempo característico
τ_{delay}	Tiempo de retraso al autoencendido
φ	Angulo del eje del chorro al sector
ϕ	Diámetro efectivo del objetivo fotográfico
ω_i	Vector característico de la clase i

Subíndices y superíndices

<i>a</i>	Aire
<i>adm</i>	Admisión
<i>ap</i>	Referido al umbral de selección a priori
<i>B</i>	Fondo (<i>Background</i>)
<i>b</i>	Bits de memoria reservados para el nivel digital de un píxel
<i>comb</i>	Combustión
<i>cum</i>	Acumulada
<i>back</i>	Referido a la presión en cámara
<i>delay</i>	Referido al tiempo de retraso al autoencendido
<i>f</i>	Combustible (<i>Fuel</i>) Final
<i>g</i>	Gas
<i>i</i>	Inicial
<i>inj</i>	Inyección
<i>ln</i>	Referido a la PDF log-normal
<i>max</i>	Máximo
<i>med</i>	Media
<i>min</i>	Mínimo
<i>N</i>	Referido a la PDF normal o gaussiana
<i>o</i>	Referida a la imagen original u origen
<i>r</i>	Referida a la imagen resultante
<i>soot</i>	Hollín
<i>tip</i>	Referido al frente del chorro
<i>S</i>	Chorro (<i>Spray</i>)
Γ	Referido a la PDF gamma

Acrónimos

APS	Conversor digital con amplificador independiente (<i>Active Pixel Sensor</i>)
CCD	Dispositivo de carga eléctrica interconectada (<i>Charge Coupled Device</i>)
CDF	Función de Distribución Acumulada (<i>Cumulative Density Function</i>)
CFA	Arreglo de Filtros de Color (<i>Color Filter Array</i>)
CFD	Código de cálculo de mecánica de fluidos (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
CMOS	Semiconductor complementario de oxido de metal (<i>Complementary Metal-Oxide Semiconductor</i>)
DI	Inyección Directa (<i>Direct Injection</i>)
DR	Rango Dinámico (<i>Dynamic Range</i>)
EDR	Rango Dinámico Efectivo (<i>Effective Dynamic Range</i>)
EOC	Final de la Combustión (<i>End Of Combustion</i>)
EOI	Final de la Inyección (<i>End Of Injection</i>)
FLC	Obturador de Cristal Líquido (<i>Ferroelectric Liquid-Crystal Light Valve</i>)
FWHM	Ancho de Banda (<i>Full Width at Half Maximum</i>)
ICCD	Cámara con arreglo de sensores CCD e Intensificador
ICMOS	Cámara con arreglo de sensores CMOS e Intensificador
IR	Radiación infrarroja
I+D	Investigación y Desarrollo
LDA	Anemometría Laser Doppler (<i>Laser Doppler Anemometry</i>)
LIF	Fluorescencia inducida por láser (<i>Laser Induced Fluorescence</i>)
LII	Incandescencia inducida por láser (<i>Laser Induced Incandescence</i>)
LL	Longitud líquida
LOL	Longitud de lift-off
LRT	Test Logarítmico de máxima verosimilitud (<i>Log-likelihood Ratio Test</i>)
LUT	Función de corrección digital (<i>Look-up table</i>)
MCIA	Motores de Combustión Interna Alternativos
MCP	Acelerador de electrones (<i>Micro-Channel Plate</i>)

MEC	Motores de Encendido por Compresión
MS	Dispersión en régimen de Mie
PD	Fotodiodo (<i>Photodiode</i>)
PDA	Anemometría Doppler de fase (<i>Phase Doppler Anemometry</i>)
PDF	Función de Densidad de Probabilidad (<i>Probability Density Function</i>)
PDI	Procesado Digital de Imágenes
PIV	Velocimetría de Imágenes de Partículas (<i>Particle Image Velocimetry</i>)
PMI	Punto Muerto Inferior
PMS	Punto Muerto Superior
PMT	Fotomultiplicador (<i>Photomultiplier Tube</i>)
SL	Nivel Digital de Saturación (<i>Saturation Level</i>)
SMD	Diámetro medio de Sauter (<i>Sauter Mean Diameter</i>)
SOC	Inicio de Combustión (<i>Start Of Combustion</i>)
SOE	tiempo de accionamiento eléctrico del inyector (<i>Start Of Energizing</i>)
SOI	Inicio de Inyección (<i>Start Of Injection</i>)
SOL	Inicio de Emisión de Radiación (<i>Start Of Luminosity</i>)
UHSC	Cámaras ultra rápidas (<i>Ultra-High Speed Cameras</i>)
UV	Radiación ultravioleta
VCO	Orificio controlado directamente por la aguja (<i>Valve Covered Orifice</i>)
ZOR	Zona de Reacción

Capítulo 1

Introducción

Contenido

1.1. Motivación del estudio	3
1.2. Objetivos y metodología	5
1.3. Estructura del documento	7
Bibliografía	9

1.1. Motivación del estudio

El gran desarrollo económico experimentado por los países industrializados ha estado ligado al incremento en la fabricación de vehículos provistos con motores de combustión interna alternativos (MCIA), dentro de los cuales el motor de encendido por compresión (MEC) se ha constituido como una de las alternativas más eficientes. Debido a la creciente conciencia social y política, en referencia a la escasez de recursos energéticos de origen fósil y a las adversas consecuencias medioambientales resultantes de la excesiva liberación de contaminantes a la atmósfera, los constructores se han visto obligados a invertir una gran cantidad de recursos en investigación y desarrollo (I+D) encaminados a obtener el mayor nivel de prestaciones del motor y disminuir la emisión de productos dando cumplimiento a la legislación actual en cuanto a emisiones contaminantes.

Para el cumplimiento de estos objetivos, se vienen realizando, de forma continuada, importantes esfuerzos para la comprensión del proceso de combustión dentro del motor. Más en concreto, dentro del campo de los motores Diesel de inyección directa, se ha observado la necesidad de estudiar el conjunto de los mecanismos físicos-químicos básicos de inyección y combustión: atomización, mezcla, evaporación y formación de productos.

El estudio experimental mediante el uso de técnicas de visualización, en combinación con otras metodologías de medida (presión en la cámara de combustión, levantamiento de aguja del inyector, etc.) y el uso de instalaciones experimentales ópticamente accesibles, que reproducen en cierta medida las condiciones de motor (maquetas y motores), ha proporcionado una valiosa información con excelente resolución espacial y temporal, tanto cuantitativa como semicuantitativa, de gran utilidad para el desarrollo de modelos fenomenológicos y de cálculo CFD (Computational Fluid Dynamics). Estos últimos, una vez ajustados y validados, permiten predecir y analizar los complejos procesos involucrados y estimar magnitudes no accesibles desde el punto de vista experimental.

Existen multitud de técnicas ópticas con diversos grados de complejidad, tanto desde el punto de vista del propio sistema experimental (sistema de iluminación, sistema de captación, procesado de los datos obtenidos, etc.) como desde el punto de vista de la accesibilidad del fenómeno a estudiar (naturaleza espectroscópica del fenómeno, duración del evento, intensidad de radiación, etc.). De esta forma, el gran desarrollo de las técnicas ha tenido una especial relación con los avances tecnológicos en diversos campos, especialmente en óptica, electrónica e informática. Se han podido desarrollar equipos capaces

de medir parámetros físicos locales del fluido de manera precisa, mediante el registro de señales luminosas que pueden ser traducidas en imágenes.

El trabajo de tesis que aquí se propone, se enmarca en el campo de estudio del proceso de inyección-combustión Diesel que se lleva a cabo en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia. Concretamente, en el desarrollo y aplicación de diferentes técnicas ópticas de medida y visualización en una serie de instalaciones experimentales ópticamente accesibles, y el desarrollo de algoritmos para el procesado automático de las imágenes: desde las más comunes funciones de lectura y escritura, hasta algoritmos más complejos para el cálculo del contorno.

La labor investigadora del grupo, se ha materializado en diferentes contribuciones a congresos internacionales, publicaciones en revistas de alto impacto especializadas en el tema, la participación en varios proyectos europeos y la realización de diversas tesis doctorales, constituyendo estas aportaciones los antecedentes directos de este trabajo de investigación. El antecedente más inmediato, ha sido la tesis doctoral de Palomares [1], quien presentó, entre otros temas, una metodología para el estudio de chorro líquido con la aplicación de la técnica de iluminación trasera difusa. El autor, además, propuso un algoritmo de umbralización basado en la ley de mínimo error de Bayes para el cálculo del nivel digital umbral que define la frontera del chorro. Utilizando técnicas láser, más complejas, Juliá [2] realiza medidas de concentración de combustible, tanto en chorros isotermos como evaporativos, mediante aplicación de las técnicas de fluorescencia inducida por láser (LIF).

Los primeros trabajos de visualización de la combustión se llevaron a cabo en motores monocilíndricos de gran cilindrada, representativos de los motores utilizados para transporte pesado por carretera, accediendo a la cámara de combustión a través de la culata mediante endoscopios de reducido diámetro. La única radiación registrable del proceso de combustión era la incandescencia del hollín, y la precisión del procesado topológico se veía limitada por la necesidad de realizar correcciones geométricas asociadas a la elevada distorsión introducida por los endoscopios y a la perspectiva del campo visualizado. Algunos resultados sobre la metodología pueden encontrarse en las tesis doctorales de Palomares [1] y García [3]. En instalaciones con accesos más amplios, García [3] realizó, además, medidas de lift-off sobre los perfiles de intensidad radiante de las imágenes de chorros aislados de la emisión de quimioluminiscencia de OH.

El trabajo de investigación de la presente tesis doctoral se enmarca en el desarrollo y puesta a punto de metodologías completas, relativamente simples y de bajo coste, para estudios de toberas reales de múltiples orificios.

Concretamente, mediante la implementación de tres técnicas de visualización:

- Dispersión de amplio espectro para la visualización de la fase líquida.
- Técnicas de Schlieren y Shadowgraph para la visualización del chorro evaporado.
- Registro de la emisión de radiación natural de la quimioluminiscente de los radicales CH y OH y de la incandescencia del hollín, para el estudio de la combustión.

Con la aplicación de las técnicas y el análisis automático de las imágenes, se midieron ciertos parámetros característicos, tanto temporales como espaciales, de las diferentes fases del procesos de inyección, evaporación, autoencendido y combustión Diesel.

1.2. **Objetivos y metodología**

El objetivo fundamental del presente trabajo de tesis es el desarrollo de metodologías de visualización robustas (adquisición y procesado de imágenes) para la caracterización, tanto espacial como temporal, de los procesos de inyección, evaporación, autoencendido y combustión Diesel, de toberas reales de múltiples orificios.

Trabajos previos realizados en el departamento, han centrado su atención al estudio de chorros aislados, generalmente limitados por la accesibilidad óptica a la cámara de combustión o por las propias características de las técnicas. Con el desarrollo de nuevas instalaciones, se ha conseguido implementar nuevas técnicas para la visualización de todos los chorros de una tobera. Concretamente, las instalaciones que serán tenidas en cuenta para este estudio son las maquetas isoterma provistas con tres accesos ópticos, el motor maqueta con la culata de acceso único y el motor óptico transparente con acceso por la cabeza del pistón.

La visualización de la fase líquida del chorro podrá llevarse a cabo en todas las instalaciones, con modificaciones en la configuración optoelectrónica según la configuración de accesos. Para que la visualización de todos los chorros sea posible, será necesario iluminar apropiadamente la cámara donde se desarrolla la inyección de modo que se pueda registrar la radiación dispersada por las gotas de combustible. Este proceso de iluminación, siendo que la dispersión es

de tipo elástico, será posible con fuentes estroboscópicas de amplio espectro e intensidad de radiación.

La visualización del chorro evaporado se consigue con la implementación de las técnicas de Schlieren y Shadowgraph, las cuales interpretan cambios en la radiación al propagarse esta por un medio ópticamente heterogéneo. De las técnicas propuestas en este trabajo, las de Schlieren/Shadowgraph son las que mayor dificultad presentan para la puesta a punto: por un lado, el sistema experimental es más complejo ya que se requiere una óptica con mayor cantidad de elementos; por otro, estas son técnicas novedosas en el grupo por lo que se requerirá el desarrollo del conocimiento necesario para la aplicación al estudio en condiciones de motor. En esta labor, se considerarán otras posibilidades de aplicación diferentes a las evaporativas.

El método más simple desde el punto de vista óptico, es el registro de la radiación natural de la quimioluminiscencia de los radicales CH y OH y de la radiación incandescente del hollín. La primera, con rangos de emisión muy inferiores a los de la radiación de alta temperatura, requerirá el uso de sistemas de adquisición intensificados y filtros especiales para el registro de sus picos característicos. La visualización del radical CH, debería aportar información acerca de la fase del autoencendido de la mezcla, mientras el OH y la radiación incandescente, ayudar al estudio y caracterización de las fases tanto de premezcla como de difusión.

Debido al gran volumen de información registrada en un estudio típico de visualización, uno de los objetivos particulares de la tesis es el diseño e implementación de algoritmos objetivos que permitan extraer de las imágenes información refinada y fiable. Su elección, está fuertemente influenciada por las características de las imágenes según el fenómeno visualizado:

- En la visualización de la dispersión de amplio espectro, el chorro estará conformado por la radiación dispersada por las gotas de combustible, mientras el fondo será la radiación dispersada por productos remanentes y reflejos en la instalación.
- En la visualización Schlieren/shadowgraphy, el chorro estará conformado por una o varias regiones con diferentes niveles de intensidad, según la configuración.
- En combustión, las zonas de reacción podrán tener una ubicación espacial muy dispersa, generalmente con superposición entre las llamas de los diferentes chorros.

A este respecto, el análisis topológico de las imágenes de chorro (líquido o vapor) consistirá en la determinación de su contorno. El algoritmo de segmentación propuesto, para el logro de este objetivo, se basa en el estudio y caracterización de los histogramas de las imágenes y la definición de un umbral óptimo con el uso de herramientas de reconocimiento de formas. El algoritmo es una extensión al LRT propuesto por Palomares [1]. El tratamiento de las imágenes de combustión se basa en el análisis estadístico de las distribuciones de intensidad observadas dentro de la cámara de combustión.

Aunque el trabajo se ha centrado, especialmente, al caso de imágenes de combustión con toberas de múltiples orificios, las metodologías podrán ser igualmente aplicables, con ligeras modificaciones que pueden intuirse fácilmente, a la obtención y análisis de imágenes de chorros aislados.

1.3. Estructura del documento

En el ámbito de la presente tesis doctoral, que es el estudio experimental de los procesos de inyección, evaporación, autoencendido y combustión Diesel, se ha requerido un conocimiento previo conceptual de la fenomenología del proceso, de forma que se facilite la elección de las mejores configuraciones para la visualización y posterior interpretación de las imágenes. De esta manera, en el capítulo 2 se presenta una breve introducción de los complejos fenómenos físico-químicos observados durante los eventos de inyección y combustión Diesel. No se trata de una revisión exhaustiva, sino una descripción general de la problemática asociada a los fenómenos observados junto a la descripción de los parámetros que los caracterizan, para con ello entrar a la descripción temporal de la emisión de radiación electromagnética presente en el proceso de combustión.

Continuando con la base contextual, en el capítulo 3, se describen las técnicas y herramientas de uso más frecuente en estudios de visualización aplicados a motores. El capítulo comienza con una descripción de las técnicas de visualización más utilizadas tanto en el estudio de los fenómenos físicos, en la etapa de formación del chorro, como físico-químicos, en la combustión. A continuación se da información del instrumental optoelectrónico y de las instalaciones experimentales, inicialmente mediante el planteamiento general característico, para entrar al caso particular de este trabajo. El capítulo se cierra con la descripción de la estructura de los algoritmos de procesado automático, haciendo especial énfasis en el estado del conocimiento de los algoritmos de segmentación aplicados al estudio del chorro Diesel.

Siguiendo el criterio de los fenómenos que se visualizan, en el capítulo 4 se presenta la metodología desarrollada para la caracterización del chorro Diesel no evaporativo. Se detalla en primer lugar el procedimiento seguido para determinar las condiciones óptimas de iluminación y el efecto de distintos aspectos geométricos y de configuración sobre la calidad de las imágenes. A continuación, se hace una descripción detallada de los algoritmos, haciendo especial énfasis en los de segmentación, como aportación innovadora, generalizando el método LRT para el caso de distribuciones no normales. Finalmente, se presentan los resultados de los ensayos de validación realizados, evidenciándose las ventajas del algoritmo propuesto en cuanto a calidad en la detección del contorno, insensibilidad a las condiciones de la imagen y un análisis de los límites de aplicabilidad.

En el capítulo 5 se proponen dos configuraciones experimentales para la visualización de chorro Diesel con las técnicas de Schlieren y Shadowgraph. Aunque el objetivo general de esta tesis es el estudio de toberas multiorificio, al ser estas técnicas de nuevo uso en el departamento, ha sido necesario realizar un estudio completo de las posibilidades de implementación y de las variables que afectan la sensibilidad, y por lo tanto, a los resultados: concretamente se hace una breve introducción a los fundamentos físicos de las técnicas, con especial énfasis en los factores que pueden afectar a la sensibilidad mediante estudios de puesta a punto, análisis de factores de influencia y procedimientos de optimización fuera de motor. La aplicación experimental, consistió en la visualización de las ondas de presión, en la maqueta isoterma, y la visualización de chorros evaporativos, reactivos o no, en motor maqueta con dos diferentes configuraciones de culatas. Los algoritmos propuestos para el análisis de las imágenes toman como base los de segmentación de chorro líquido con pequeñas modificaciones.

La visualización del autoencendido y combustión, se lleva a cabo en el capítulo 6, mediante el registro de la emisión natural de quimioluminiscencia de los radicales CH y OH y de la radiación térmica del hollín. Definida la configuración experimental, se realiza un análisis de sensibilidad a la configuración del instrumental de adquisición con la descripción temporal de sucesos. Debido a las características de las imágenes, los algoritmos para el procesado se basan en el análisis estadístico de las distribuciones de intensidad tanto en la cámara de combustión como por sectores, midiendo los parámetros característicos espaciales sobre los perfiles de intensidad y no sobre contornos segmentados.

En el capítulo 7 se exponen las conclusiones de la tesis y se plantean algunos posibles desarrollos futuros.

Bibliografía

- [1] Palomares A. *Análisis de imágenes de chorros diesel*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2001.
- [2] Juliá J.E. *Medida de concentraciones de combustible en chorros diesel mediante técnicas de fluorescencia inducida por láser*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003.
- [3] García J.M. *Aportaciones al estudio del proceso de combustión turbulenta de chorros en motores diesel de inyección directa*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2004.

Capítulo 2

Los procesos de inyección y combustión en motores Diesel

Contenido

2.1. Introducción	13
2.2. Fases del proceso	13
2.3. Formación del chorro Diesel	15
2.3.1. Fenómenos físicos	16
2.3.1.1. Flujo interno	16
2.3.1.2. Atomización y coalescencia	17
2.3.1.3. Evaporación y mezcla	18
2.3.2. Caracterización	19
2.3.2.1. Caracterización hidráulica de toberas	20
2.3.2.2. Caracterización macroscópica del chorro	20
2.3.2.3. Características de la dinámica interna del chorro	22
2.4. Combustión del chorro Diesel	24
2.4.1. Fenómenos físico-químicos	24
2.4.1.1. Autoencendido	24
2.4.1.2. Combustión de premezcla	25
2.4.1.3. Combustión por difusión	26
2.4.2. Caracterización	27
2.4.2.1. Tiempos característicos	27
2.4.2.2. Distribución de la temperatura y concentración de productos	29

2.4.2.3. Longitud de Lift-Off	30
2.5. Resumen	30
Bibliografía	33

2.1. Introducción

En este capítulo se presenta el contexto de la tesis doctoral que es el estudio experimental de los procesos de inyección-combustión Diesel mediante el uso de técnicas ópticas de visualización y procesamiento digital de imágenes (PDI). Concretamente, se hace una breve introducción de los complejos fenómenos físico-químicos observados durante los eventos de inyección y combustión Diesel. Este no pretende ser un estudio exhaustivo del problema, sino una descripción general de la problemática asociada a los fenómenos observados con las metodologías tratadas en la tesis doctoral. La definición de los fenómenos estará acompañada de una descripción de los parámetros que los caracterizan, para con ello entrar a la descripción temporal de la emisión de radiación electromagnética presente en el proceso de combustión Diesel. Un conocimiento previo conceptual, mediante un análisis cronológico de los fenómenos, facilitará la interpretación de imágenes producto de la visualización.

2.2. Fases del proceso

Probablemente la forma más tradicional de representar la evolución del proceso de combustión de un motor Diesel es la comparación entre la evolución temporal de la masa de combustible inyectada por unidad de tiempo (tasa de inyección¹), y la energía liberada en el proceso de combustión por unidad de tiempo (tasa aparentemente de liberación de calor). Este último parámetro se calcula a partir de la medida de presión instantánea, mediante la aplicación combinada de la primera ley de la termodinámica y de las ecuaciones de estado al volumen de gas encerrado en el cilindro [1]. Otras propiedades termodinámicas se pueden estimar mediante la aplicación de modelos de diagnóstico de la combustión basados en estos mismos conceptos [2, 3]. En la figura 2.1 se puede observar un ejemplo de la evolución temporal de ambas tasas características para un motor Diesel de inyección directa. La secuencia de fases se describe a continuación:

- **Tiempo de retraso (τ_{delay}):** Esta fase empieza con el inicio de la inyección del combustible (SOI) y termina cuando se produce el inicio del proceso de combustión (SOC). Durante esta fase (definida desde el instante de tiempo en el cual la tasa de inyección crece por encima de cero), el combustible se mezcla con el aire gracias a una serie de procesos físicos como son la atomización del combustible líquido, la evaporación

¹Definida la ‘tasa’ de una variable como su derivada temporal.

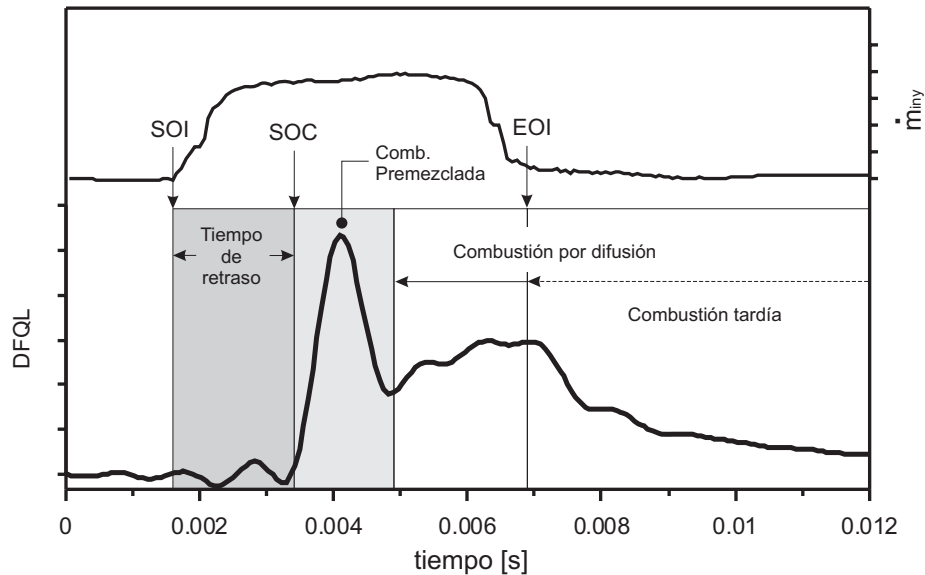


Figura 2.1: Diagrama de la tasa de inyección y de la tasa de liberación de calor para un motor Diesel de inyección directa donde se identifican las fases del proceso de combustión.

del combustible atomizado y el englobamiento de aire. Estos procesos se describen en § 2.3.

Dadas las propiedades termodinámicas de la atmósfera donde se inyecta, la mezcla de aire y combustible no es estable. En el seno de la misma comienzan a darse prereacciones químicas de baja intensidad que producen la rotura de moléculas de combustible en cadenas de hidrocarburos más cortas, junto con la formación de radicales libres². Las prereacciones culminan con el autoencendido espontáneo de la mezcla marcando el final de la fase de retraso (ver § 2.4.1.1). Dicho autoencendido suele definirse como el momento en que se produce un crecimiento súbito de la ley de liberación de calor. La duración de esta fase dependerá de las condiciones operativas del motor.

- **Combustión premezclada:** Esta fase es la que sigue al τ_{delay} . De carácter no estacionario, se caracteriza por una rápida oxidación del combustible que se ha mezclado con el aire entre los límites de inflamabilidad en la fase previa. La cinética química entra en una fase de

²Sustancia intermedia extremadamente inestable y, por lo tanto, con gran poder reactivo.

alta temperatura con lo que la tasa de consumo de combustible crece de una manera elevada y como consecuencia se presenta una elevada tasa de liberación de calor. El fuerte incremento de temperatura junto con el aumento brusco de presión en un intervalo de tiempo tan corto, favorece el ruido de motor característico de los Diesel. A partir del consumo de combustible se forman tanto las especies finales CO_2 y H_2O , como los productos intermedios precursores del hollín. La forma característica de la ley de liberación de calor durante esta etapa es un perfil casi triangular con un máximo y una caída a un mínimo relativo donde se suele definir el final del proceso de combustión premezclada.

- **Combustión por difusión:** Una vez se consume toda la masa de mezcla adquirida en el tiempo de retraso, se observa una tasa más baja de liberación de calor que corresponde a la fase de combustión por difusión. La ley de liberación de calor durante la combustión por difusión está controlada principalmente por el proceso de mezcla del combustible evaporado con el aire en el interior de la cámara de combustión [4]. La hipótesis generalmente asumida es que la combustión durante esta fase se realiza en condiciones localmente estequiométricas o próximas a ella. Durante esta fase la estructura de la llama alcanza un período cuasi-estacionario que se mantiene mientras se siga inyectando combustible.
- **Combustión por difusión tardía:** Una vez se termina el aporte de combustible (EOI), termina el período cuasi-estacionario de la combustión por difusión. En esta fase final, de combustión por difusión tardía, cesa el aporte de cantidad de movimiento del chorro para el proceso de mezcla, observándose un decrecimiento progresivo de la ley de liberación de calor causado por el deterioro del proceso de mezcla aire-combustible. El fenómeno de oxidación queda controlado entonces por la turbulencia residual que queda en la cámara de combustión hasta que se consuma todo el combustible.

2.3. Formación del chorro Diesel

Tras el inicio del proceso de inyección, el chorro Diesel penetra en una atmósfera con la que debe mezclarse para que se pueda producir la combustión. Este proceso de mezcla es de carácter puramente físico, siendo en muchas ocasiones estudiado en condiciones de atmósfera inerte en instalaciones relativamente simples. En estas instalaciones (como se verá en el próximo capítulo) será posible aislar los fenómenos físicos y eliminar el efecto de los fenómenos

químicos del proceso de oxidación. A continuación se presenta un resumen de los fenómenos físicos presentes en el proceso de mezcla y su caracterización.

2.3.1. Fenómenos físicos

La dinámica del chorro Diesel viene determinada por múltiples factores como son: las características del flujo de combustible en el interior del inyector (principalmente en el orificio de la tobera), la interacción entre las gotas de combustible (atomización y coalescencia), la interacción del chorro con el aire (evaporación y mezcla)... Estos procesos no son independientes y la interacción entre ellos determina el comportamiento global del chorro Diesel.

2.3.1.1. Flujo interno

El flujo de combustible viene determinado por la geometría de los orificios de la tobera de inyección, afectando directamente las características del chorro y por tanto el proceso de mezcla [5]. Como consecuencia de las condiciones operativas de los sistemas de inyección actuales, en los que se inyecta a presiones muy elevadas (hasta unos 200 MPa) con diámetros de toberas muy pequeños (incluso por debajo de 100 μm), el flujo de combustible está sometido a fuertes gradientes de presión y alcanza velocidades muy altas que provocan la aparición de fenómenos físicos bastante complejos como el de la cavitación [6].

La cavitación se define como la formación rápida de paquetes de vapor en un fluido en movimiento en regiones de muy baja presión. En el fenómeno de cavitación puede entenderse que se modifica tanto la sección de paso como la densidad del combustible, afectando las características instantáneas del flujo (flujo másico, velocidad de salida, coeficiente de descarga, etc.).

La cavitación depende fundamentalmente de la geometría interna de la tobera de inyección mediante la relación longitud/diámetro del orificio y del salto de presiones entre el interior y exterior del inyector. La tecnología actual permite la fabricación de toberas con diferente geometría interna, (cilíndrica, convergente o divergente), teniendo esta geometría efectos directos sobre el proceso de cavitación y, por tanto, sobre la morfología del chorro Diesel. Mediante la aplicación de técnicas ópticas de visualización y el procesado de imágenes digitales, es posible observar estas diferencias en chorros inyectados con toberas con diferente geometría de orificio. Ejemplos de la caracterización macroscópica de chorros Diesel con inyectores con diferente geometría de orificio se pueden encontrar en [7, 8].

Mayor detalle y referencias sobre el estudio del flujo interno se pueden encontrar en las tesis doctorales de Gimeno [9], Salvador [10] y González [11].

2.3.1.2. Atomización y coalescencia

Tras la descarga del combustible por la tobera de inyección, se presenta el fenómeno de atomización de la vena líquida, la cual deja de formar un medio continuo para romperse en gotas y ligamentos de diverso tamaño. La superficie de contacto existente entre el aire y el combustible aumenta, favoreciendo los procesos físicos que van a condicionar la formación de la mezcla (englobamiento de aire y evaporación). De esta forma, cuanto menor sea el diámetro de las gotas, mayor será la relación superficie-masa del combustible en contacto con el aire caliente, y por lo tanto, existirá una mayor tasa de evaporación y una mayor eficiencia en la combustión.

En los chorros líquidos de régimen turbulento, entre los cuales se encuentra el chorro Diesel de inyección directa, la atomización se considera completa cuando desaparece el ligamento líquido en el interior del chorro y solamente existen gotas en el aire. Estas gotas son tan pequeñas que se alcanza rápidamente el equilibrio dinámico de las mismas con la corriente de aire que las envuelve. Ello implica que la mezcla alcance un equilibrio entre fases, tanto térmico como de velocidad.

La atomización ocurre a cierta distancia, conocida como *longitud de la vena líquida* o *longitud intacta*, y al cabo de un tiempo llamado *tiempo de ruptura*. Esta característica depende mucho de las condiciones operativas (condiciones de motor, características del sistema de inyección, condiciones de inyección, etc.). Algunos autores como Hiroyasu y Arai [12] han estudiado la influencia de diferentes factores sobre la *longitud intacta*, ya que este parámetro proporciona información acerca del grado de atomización del chorro, encontrando dependencias con la geometría de orificio del inyector, la cavitación y la relación de densidades líquido-ambiente.

Los mecanismos que gobiernan el régimen de atomización completo aún no son del todo conocidos. Estos fenómenos ha sido ampliamente estudiados para el caso de chorros Diesel como resume Heywood [13], tanto desde un punto de vista experimental como de modelado. Las teorías enmarcan el problema como un conjunto de diferentes factores: la ruptura debida a inestabilidades aerodinámicas, la turbulencia, la cavitación y el reagrupamiento del perfil aerodinámico. Todo ello mediante el estudio de las distribuciones de tamaños y velocidades de gotas y la relación entre el ángulo de apertura del chorro y las diversas condiciones de contorno del problema.

En estudios como el de Lee y Reitz [14], la aplicación de métodos de visualización, han permitido profundizar en la comprensión de los mecanismos de atomización para chorros líquidos de gran velocidad. Se concluye que la atomización puede ser mejorada con el incremento de la velocidad entre las gotas de combustible y el aire que las rodea. Por otro lado Hattori *et al.* [15], presentan una serie de imágenes del desarrollo inicial del chorro Diesel en condiciones isotermas que muestra como se forma la zona de atomización. En ambos casos se utilizan las técnicas ópticas de visualización para obtener imágenes del chorro iluminado con fuentes de luz de alta intensidad o con lámina láser.

Una vez el chorro líquido se ha disgregado en gotas puede ocurrir que algunas de ellas choquen entre sí formándose nuevas gotas de tamaño mayor, lo cual se denomina *coalescencia*. Este fenómeno es muy frecuente en los chorros Diesel, debido a la gran concentración de gotas y la gran dispersión de velocidades que favorecen la interacción. Por otro lado las gotas atomizadas pueden interactuar con el aire de la cámara de combustión presentándose la *atomización secundaria*. La *atomización secundaria* esta controlada por la relación entre las fuerzas aerodinámicas y las de tensión superficial, aunque para chorros densos como el Diesel su estudio es muy complejo por las dificultades para establecer la velocidad relativa aire-gotas. La cuantificación de estos fenómenos es extremadamente compleja ya que es necesario estimar las probabilidades de choque entre las gotas y sus velocidades para analizar el grado de coalescencia. Más detalles en el estudio de estos fenómenos se encuentran en las tesis de Arrègle [16] y Correas [17].

2.3.1.3. Evaporación y mezcla

Una vez el chorro líquido se ha disgregado en forma de gotas, estas empiezan a avanzar en la cámara de combustión en donde los mecanismos de atomización se vuelven menos importantes, cobrando importancia los de mezcla del aire con el combustible. La interacción de las gotas con el aire existente en la cámara de combustión, determinan la formación de la mezcla e influyen directamente sobre el proceso de combustión.

El flujo de aire en el motor es de carácter no estacionario, turbulento y depende de numerosos parámetros relacionados con las condiciones de funcionamiento y la geometría del motor (pistón, cámara de combustión, válvulas de admisión y escape ...). En su estudio teórico se intentan resolver las ecuaciones de conservación que rigen el comportamiento del fluido, y se utilizan modelos de turbulencia y/o datos experimentales para completar los sistemas de ecuaciones.

Desde el punto de vista experimental, en el estudio del movimiento del aire es necesario disponer de datos en condiciones cercanas a las reales (cerca del PMS donde tiene lugar el evento de inyección). La caracterización del flujo del aire en el motor implica la determinación de los campos de velocidades que permiten evaluar la existencia de vórtices en el flujo, medir el nivel de turbulencia, etc. En particular, el análisis de las velocidades de rotación de la carga (*swirl*) y de confinamiento de aire en el pistón (*squish*), es especialmente importante, ya que estos fenómenos pueden favorecer el proceso de mezcla aire-combustible y facilitar el proceso de combustión. Más detalles sobre el estudio del movimiento del aire en el motor se pueden encontrar en Pastor [18].

En condiciones de motor, el aire se encuentra a alta temperatura con lo que se presenta un intercambio de energía con las gotas de combustible. Este intercambio provoca un aumento de la temperatura de la gota, la cual va disminuyendo progresivamente su tamaño hasta desaparecer. De esta manera se incrementa la cantidad de combustible que sufre cambio de fase.

Mientras en los primeros instantes de la inyección la fase líquida llega hasta el frente del chorro, a partir de una cierta distancia denominada *longitud líquida máxima*, dicha fase no supera este límite, aunque el chorro de combustible sigue penetrando pero ya en fase vapor. La *longitud líquida máxima* se alcanzará entonces en el punto en que la masa de aire englobada por un paquete o fracción de combustible en el chorro, sea suficiente para evaporar todo el combustible de ese paquete.

De acuerdo con los resultados experimentales de diferentes autores, las condiciones de contorno que influyen en el establecimiento de la *longitud líquida máxima* son el diámetro de tobera, la temperatura y densidad del aire y las características del combustible. No obstante, no se observa influencia clara de la presión de inyección [19, 20]. Siebers [19] concluye entonces que el proceso que condiciona la evaporación es la mezcla, determinada por la interacción del chorro con el aire englobado existente en la cámara de combustión.

2.3.2. Caracterización

La caracterización de los complejos fenómenos físicos presentes en el proceso de inyección Diesel, se consigue mediante la realización de diferentes tipos de medidas experimentales, que aportan información precisa e indispensable para el ajuste de modelos fenomenológicos y predictivos. La caracterización del proceso de formación del chorro Diesel, se puede llevar a cabo, mediante la caracterización hidráulica de las toberas, la caracterización de la geometría del chorro, el estudio de la dinámica interna del chorro, etc. La caracterización

de la geometría del chorro Diesel, se realiza mediante la aplicación de técnicas ópticas de las cuales se hablará en el próximo capítulo.

2.3.2.1. Caracterización hidráulica de toberas

Los parámetros característicos del flujo de combustible en la tobera son la tasa de inyección (\dot{m}_f) y el flujo de cantidad de movimiento (\dot{M}_f). La medida de la tasa de inyección es bastante compleja, aunque la importancia experimental y teórica que tiene en el estudio de los motores, ha conducido al desarrollo de diferentes métodos de medida entre los cuales el más utilizado es el conocido como método de Bosch [21]. La medida del flujo de cantidad de movimiento del chorro está basada en la presión producida por el impacto de las gotas de combustible en un sensor piezoeléctrico. A partir de esta medida y realizando una calibración previa del equipo, es posible medir la fuerza que el chorro ejerce sobre el sensor, y que es equivalente a la cantidad de movimiento del flujo que sale por el orificio de la tobera [22].

La combinación de las medidas de la tasa de inyección y del flujo de cantidad de movimiento, permiten calcular el valor estimado de la velocidad efectiva del chorro a la salida del orificio y el diámetro efectivo de flujo determinada por la sección de paso del combustible que fluye en fase líquida. Aplicando la ecuación de Bernoulli para P_{inj} y P_{back} (presiones en la tobera y en la cámara donde se inyecta), se calcula adicionalmente la velocidad teórica de salida. Con estos parámetros y conociendo la geometría del orificio, será posible calcular diferentes valores adimensionales que sirvan a la caracterización de toberas de inyección, como son los coeficientes de velocidad y sección de flujo [5, 9].

2.3.2.2. Caracterización macroscópica del chorro

Para asegurar una buena mezcla aire-combustible el chorro tiene que penetrar en la cámara de combustión y abrirse, englobando aire tanto por los lados como por el frente. La descripción macroscópica del chorro Diesel considera de forma generalizada la interacción que tiene éste con el aire presente en la cámara de combustión. Existen varios parámetros importantes a la hora de caracterizar un chorro Diesel desde el punto de vista macroscópico: los datos de longitud característica —longitud líquida (LL) y penetración del frente del chorro (L_{tip})—, el ángulo de apertura y el volumen de aire englobado por el chorro, son los más comunes.

Longitudes características

Las medidas de longitud son de las más inmediatas a la hora de realizar un estudio macroscópico del chorro Diesel. Las curvas de la evolución de la longitud líquida del chorro, incluido el establecimiento de la *longitud líquida máxima* (LL_{max}), y la evolución del frente del chorro, son características frecuentemente estudiadas experimentalmente.

La longitud líquida máxima, es un indicador de la capacidad de vaporización del combustible y se define como la distancia que recorre un paquete de combustible desde el orificio de la tobera hasta que encuentra las condiciones necesarias para su completa evaporación. Después de su establecimiento, el chorro Diesel evaporado continuará penetrando, englobando aire y mezclándose.

La penetración del frente del chorro determina en gran medida tanto el proceso de mezcla como la probabilidad de choque contra las paredes de la cámara de combustión. Depende fundamentalmente de la cantidad de movimiento instantánea del chorro a la salida del orificio del inyector y de su ángulo de apertura como lo deducen Naber y Siebers [23] en un estudio en el que analizan el efecto de la densidad ambiental sobre este parámetro.

En la literatura se encuentran diferentes ecuaciones empíricas o semi-empíricas para la estimación de la penetración en función de diversos parámetros como la presión de inyección, geometría de orificio, velocidad de salida, densidad del ambiente, etc. Autores como Arrègle [24], Correas [17], Dent [25], Hay y Jones [26], han puesto de manifiesto la dependencia temporal de la penetración con la raíz cuadrada del tiempo para tasas rectangulares. No obstante, como concluyen Benajes *et al.* [27], el desarrollo de la penetración cambia para otras tasa de inyección, especialmente al inicio del evento. El estudio experimental de la penetración del chorro requiere el uso de diferentes técnicas ópticas de visualización, como se resume en el próximo capítulo.

Ángulo de apertura del chorro

El ángulo del chorro es otro parámetro de los más extensamente estudiados por los diferentes autores, y se suele definir como el ángulo que forman dos rectas que se ajustan al contorno del chorro en su zona estacionaria, y que se cruzan en el orificio del inyector. Junto con la penetración, son los parámetros más inmediatos a extraer de los resultados experimentales con el procesado automático de las imágenes.

Este parámetro depende de las condiciones de inyección y de las características del inyector, así como de las propiedades del líquido inyectado y del gas ambiente. En el caso de chorro líquido atomizado, el ángulo depende fundamentalmente del régimen de atomización del líquido [28]. En régimen de atomización completa, el chorro Diesel se abre a la salida del orificio y el ángulo se mantiene constante durante todo el tiempo de inyección para chorros estacionarios. En la literatura aparecen numerosas expresiones basadas en consideraciones teóricas y experimentales que lo describen [12, 23, 24, 29, 30]. La mayoría de los autores coinciden en que depende principalmente de la relación de densidades que engloba los fenómenos de interacción aerodinámica líquido-gas y la geometría del orificio, aunque se desconoce en que medida y cuáles son los fenómenos físicos involucrados más relevantes.

Volumen de aire englobado

El englobamiento de aire o volumen de aire englobado o desplazado por el chorro, es el parámetro que caracteriza el proceso de mezcla, y es éste el que controla la combustión. La relevancia de este parámetro se manifiesta en el elevado número de estudios que se han realizado sobre él. Como ejemplo, diferentes autores [24, 31–33] han propuesto ecuaciones en las que se ponen de manifiesto dependencias del volumen de aire englobado con diferentes parámetros del sistema de inyección (diámetro de orificio, presión de inyección, etc.) y del ambiente (densidad del aire, temperatura, velocidad del aire, etc.).

Dentro del contexto de los chorros líquidos atomizados, el englobamiento de aire constituye un factor clave en el proceso de evaporación del chorro. En la mayoría de las condiciones operativas de un motor Diesel de inyección directa, la evaporación está controlada por la mezcla. Siebers [19, 34] justifica esta afirmación realizando un estudio paramétrico experimental con la ayuda de técnicas de visualización y propone un modelo muy sencillo para calcular la longitud líquida del chorro. Como parámetro característico, el englobamiento de aire está relacionado directamente con otros como el ángulo de chorro el cual cuanto mayor sea mayor será el volumen de aire desplazado. Más información acerca del estudio del englobamiento de aire puede encontrarse en López [35].

2.3.2.3. Características de la dinámica interna del chorro

La descripción microscópica del chorro Diesel está caracterizada por el contenido y distribución de gotas de diversos tamaños y velocidades. Aunque este tema no se abarca en el objetivo de estudio de la presente tesis doctoral, si se

plantean las medidas que se suelen realizar mediante la aplicación de técnicas ópticas. Entre las características microscópicas se destacan la distribución de diámetros y de velocidades de gotas.

Distribución de tamaños de las gotas

Los mecanismos de atomización (primaria y secundaria) y de coalescencia, son los que determinan la distribución del tamaño de las gotas de combustible durante el proceso de inyección. Dado que el tamaño de gotas en un punto cualquiera del chorro presenta una gran variabilidad tanto espacial como temporal, se suele calcular un diámetro medio representativo de todo el conjunto. Muchas son las maneras de definir el diámetro medio y cada aplicación tiene un diámetro medio que le resulta más apropiado [36]. De forma general, un diámetro medio se define como:

$$d_{ab} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n d_i^a}{\frac{n}{\sum_{i=1}^n d_i^b}} \right]^{1/(a-b)}$$

En este caso, por ejemplo, d_{10} sería el diámetro medio aritmético y d_{20} sería el diámetro medio tal que multiplicado por n (número de gotas) tendría la misma superficie que toda la población. El diámetro medio que tiene la misma relación volumen/superficie que toda la población (d_{32}) es llamado *diámetro medio de Sauter* (SMD), el cual, se puede interpretar como el diámetro de las gotas de un chorro monodisperso que tuviera la misma relación volumen/superficie que el chorro polidisperso [37]. En la literatura se pueden encontrar diferentes trabajos que ponen de manifiesto la dependencia del SMD con los diferentes parámetros del sistema de inyección y con las características del medio donde se inyecta [24, 37, 38].

Distribución de velocidades y concentraciones de gotas

La distribución de velocidades proporciona información sobre la ley de frenado relacionada con las fuerzas de inercia y aerodinámicas. Normalmente va ligada tanto teórica como experimentalmente a la distribución de diámetros.

La concentración de combustible presente en el chorro Diesel depende de los mismos fenómenos físicos que la distribución de diámetros de gotas. Este proporciona información sobre el proceso de englobamiento de aire, dando una

medida directa del proceso de atomización en el caso de la fase líquida y del proceso de mezcla en la fase vapor. Más información sobre el estudio de la concentración de combustible y distribución de velocidades de gotas, puede encontrarse en [16, 17, 33, 39–41].

2.4. Combustión del chorro Diesel

En condiciones reales de motor el aire dentro de la cámara de combustión está compuesto en parte de moléculas de oxígeno. El producto de la interacción del combustible evaporado con el aire será entonces una mezcla altamente inestable que entra en reacción cuando, transcurrido un cierto tiempo desde el inicio de la inyección, alcanza las condiciones que permitan la liberación de la energía del combustible en una sucesión de acontecimientos de carácter físico-químicos.

2.4.1. Fenómenos físico-químicos

Estos fenómenos se observan en el desarrollo de las fases descritas al inicio del capítulo. En primer lugar se observa la rotura de las moléculas del combustible en cadenas más cortas junto con la formación de productos intermedios. A ellos les sigue un proceso de liberación apreciable de calor en dos fases finales, una de carácter transitorio denominada fase de premezcla y la fase final de combustión por difusión (con o sin aporte de cantidad de movimiento). La liberación de calor influirá en las condiciones termodinámicas locales del chorro, actuando simultáneamente sobre el proceso de mezcla.

2.4.1.1. Autoencendido

Es común definir el autoencendido espontáneo de la mezcla como el instante en el cual se observa una reacción altamente exotérmica que se manifiesta con un crecimiento súbito de la ley de liberación de calor. No obstante, Higgins *et al.* [42] entre otros, afirman que el proceso comienza con una primera fase de reacción de baja temperatura en la cual se consume combustible mediante reacciones de rotura de cadena que forman radicales libres con una tasa de reacción relativamente baja. Con ello tiene lugar la aparición de las especies intermedias activas y la liberación de energía que va a llevar al establecimiento de la reacción exotérmica.

En esta primera etapa del autoencendido, se puede observar un aumento casi imperceptible de la presión en la cámara de combustión antes del aumento

súbito de la ley de liberación de calor. Simultáneamente, es posible percibir una emisión natural de radiación de baja intensidad que corresponde a la emisión de quimioluminiscencia de radicales libres cuando estos regresan a su estado de equilibrio energético [43]. El origen de esta quimioluminiscencia se atribuye principalmente a la existencia de formaldehído (CH_2O) y del radical CH^* [44]. La radiación de quimioluminiscencia aparece inicialmente en aquellas ubicaciones del chorro en las que se ha formado una mezcla con condiciones de temperatura y composición suficiente para que se de el inicio de las reacciones químicas. Estas zonas pueden variar en función de las condiciones de contorno, apareciendo bien a los lados del chorro o bien en el frente [43].

Pasado cierto tiempo se observa un aumento tanto de la presión como de la señal luminosa. La temperatura de la mezcla sigue aumentando tanto por la liberación de calor de las reacciones de baja temperatura, como por el englobamiento de aire, originando que la reacción entre en una etapa de alta temperatura. El proceso se vuelve fuertemente exotérmico con un importante aumento en el consumo de combustible, mientras se forman tanto especies finales como precursoras del hollín.

2.4.1.2. Combustión de premezcla

La fase de combustión premezclada coincide con el inicio de la etapa final de alta temperatura del período del autoencendido [42]. Tiene un cierto carácter transitorio, pues durante la misma reacciona todo el combustible que se ha mezclado dentro de los límites de inflamabilidad durante el tiempo de retraso y que aun no se ha quemado. Así que si el tiempo de retraso es grande, la cantidad de combustible inyectado, evaporado y mezclado, será igualmente grande, por lo que se quemará una gran cantidad de mezcla en un lapso de tiempo muy corto, ocasionando importantes gradientes de presión y temperatura.

En este período comienza a formarse hollín en la zona donde se percibe mayor actividad de quimioluminiscencia en el chorro. De hecho, Dec [43] estudia el proceso de formación de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), con el objetivo de determinar las características tempranas de la combustión. En su estudio utiliza técnicas de fluorescencia inducida por láser (PLIF) observando la presencia de los PAHs donde ya se había percibido la presencia de radicales libres.

Con el paso del tiempo, el chorro sigue su proceso de desarrollo y se comienza a observar un aumento en varios órdenes de magnitud de la intensidad de radiación debido a la aparición de hollín incandescente. Dec y Espey [45],

mediante visualización, utilizando dos técnicas láser, detectan las primeras trazas de hollín en su etapa temprana de formación. Indican los autores que el hollín que aparece en toda la zona de quimioluminiscencia, está constituido por partículas inicialmente muy pequeñas. Más tarde, observan los autores partículas de mayor tamaño en la zona del frente del chorro dando lugar a una distribución de tamaños creciente.

De acuerdo con estos y otros resultados obtenidos mediante estudios de visualización [43–45], observan el instante en que aparece el hollín en un tiempo posterior al inicio de la fase de combustión premezclada, cercano al máximo característico de la tasa de liberación de calor. Existen ligeras variaciones entre autores, que se han atribuido a la configuración de los sistemas de inyección (toberas de uno o más chorros) y a la medida y filtrado de las señales de presión en cámara.

El final de la fase de combustión premezclada, estará marcado por el establecimiento de las condiciones favorables para una combustión autosustentada. Inicialmente se define una zona de reacción estable en el frente del chorro, que se desplaza hacia la tobera, pero sin llegar a ella, dando lugar al fenómeno conocido como “lift-off”.

2.4.1.3. Combustión por difusión

Con el establecimiento de la llama difusiva se dan por concluidos los pasos del autoencendido del chorro, entrando en una período cuasi-estacionario donde se aporta la mayor parte del calor de la reacción. En esta fase, donde la mezcla de combustible con el aire y la combustión ocurren simultáneamente, es la tasa de mezcla la que controla el proceso. En cuanto al instante en que ocurre el establecimiento de la llama difusiva, se presentan algunas discrepancias a la hora de definirlo. Dec y Coy [46], por ejemplo, indican, de estudios de visualización del radical OH^* , que este ocurre en un punto posterior pero cercano al máximo de la tasa de liberación de calor.

El modelo comúnmente asumido para la descripción de la llama de difusión, es el planteado por Dec [43]. Según el autor, la zona reactiva de la llama, rodea una zona que contiene hollín y combustible sin quemar, que luego alcanzará la superficie de reacción en el frente de llama. En esta posición, donde la relación oxígeno-combustible se asume es la estequiométrica, se alcanzan temperaturas cercanas a la adiabática, con lo cual, la tasa de formación de óxidos de nitrógeno, muy dependiente de la temperatura, se activa de manera considerable. De igual manera, el hollín formado previamente se oxida fundamentalmente debido a la presencia del radical OH^* y las altas temperaturas.

Mientras exista aporte de combustible, la zona reactiva del chorro estará despegada de la tobera, con una zona no reactiva donde dominan los fenómenos físicos de mezcla descritos en el proceso de formación del chorro. La longitud de esta zona es la conocida como longitud de lift-off (LOL) y es donde el chorro engloba los gases presentes en el cilindro por la parte interior del chorro, en un proceso combinado de convección y difusión.

El aire englobado en la sección del lift-off se combina junto con el combustible evaporado, creando una combustión premezclada rica, de gran similitud con la combustión premezclada del tiempo de retraso. Puesto que el dosado local es alto, el oxígeno englobado reacciona totalmente quedando una gran proporción de productos parciales, como hidrocarburos de cadena corta y precursores del hollín PAHs. A partir de allí, las nuevas especies, a alta temperatura y con el oxígeno disponible solamente en forma de productos como CO, CO₂ y H₂O, se dirigen a la zona encerrada por la superficie de la zona reactiva.

Una vez finaliza la inyección termina el aporte de combustible y con ello el proceso de mezcla, por lo que desaparece el fenómeno de lift-off. La reacción continúa favorecida por la turbulencia residual que queda en la cámara de combustión. Gradualmente la emisión de radiación térmica del hollín va disminuyendo hasta desaparecer en la carrera de expansión del motor.

2.4.2. Caracterización

La caracterización de la fenomenología de un proceso tan complejo como el de combustión, sólo ha sido posible gracias al desarrollo de un gran número de métodos experimentales. Algunos de ellos estudian las consecuencias del proceso como son las medidas de prestaciones, emisión de contaminantes, consumo de combustible y el análisis de la evolución de la presión dentro del cilindro. El uso de estas metodologías, proporcionan información útil sobre las características del proceso, aunque no aportan información de la forma como se desarrollan los fenómenos en el interior de la cámara de combustión. En este punto, las técnicas ópticas permitirán realizar un seguimiento de los diferentes fenómenos físico-químicos del proceso mediante la obtención de diferentes parámetros característicos como los que se indican a continuación.

2.4.2.1. Tiempos característicos

El tiempo de retraso del autoencendido τ_{delay} , es el parámetro que caracteriza el autoencendido espontáneo de la mezcla. Se define como el tiempo transcurrido desde el inicio del evento de inyección en su tiempo característico

τ_{SOI} , hasta el instante en que comienzan las reacciones exotérmicas que marcan el tiempo de inicio de la combustión τ_{SOC} . Este último parámetro, τ_{SOC} , define el comienzo de la fase de combustión premezclada.

El instante del inicio de la inyección se puede obtener de la tasa de inyección, como el instante en el cual la tasa de inyección crece por encima de cero (ver § 2.2), o mediante visualización, como el instante en el cual se observa la primera gota de combustible que sale por el orificio de la tobera. Un punto comúnmente utilizado para referenciar la inyección, suele ser el tiempo de accionamiento eléctrico del inyector τ_{SOE} ('Start of energizing'), que básicamente difiere del SOI en el retraso hidráulico del sistema de inyección.

En la literatura es posible encontrar una gran variedad de técnicas empleadas en el estudio del proceso de autoencendido, y por lo tanto, un gran número de criterios a la hora de definir lo que se entiende como inicio de la combustión (SOC). Así existen estudios en los cuales se mide la presión y la temperatura en un entorno controlado en el que se define el τ_{SOC} como el cambio brusco en la tendencia de estas propiedades [13, 47].

El uso de técnicas de visualización, son un buen ejemplo de cómo los criterios de definición del SOC pueden cambiar con la evolución de la técnica. En sus comienzos, dichos métodos consistían únicamente en el registro de la radiación térmica del hollín. Con la mejora de la sensibilidad de los elementos fotorreceptores, se ha podido observar la presencia de radiación natural de baja intensidad de productos intermedios, como las emisiones de quimioluminiscencia.

Un ejemplo de la aplicación de técnicas de visualización en el estudio del proceso de autoencendido y definición del τ_{SOC} , es el trabajo de Higgins *et al.* [42] el cual consistió en el estudio de la evolución temporal de la combustión. Las técnicas empleadas fueron la medida de la presión en una cámara de volumen constante y el registro de la emisión natural de especies intermedias mediante visualización con cámaras CCD con intensificador (ICCD) y sistemas monorreceptores de fotomultiplicador PMT. En este último caso fue posible obtener la evolución temporal integrada de la luminosidad de un mismo evento de inyección-combustión. No obstante, para poder determinar las zonas de mayor actividad fue necesario aumentar la resolución espacial de la información mediante la adquisición de imágenes digitales.

Otro buen ejemplo se observa en el trabajo de Edwards *et al.* [48] donde se comenta la diferencia entre los criterios para fijar el SOC según se tomaran imágenes con cámaras rápidas o se midiera la radiación con un fotodiodo. Muestran cómo existen débiles emisiones justo antes del SOC obtenido de las curvas de liberación de calor. La adquisición de las imágenes se llevo a cabo con

un montaje de Schlieren en la configuración de transmisión similar al que se tratará en el capítulo 5 de este trabajo. Por otra parte Dec y Espey [45] llegaron a la misma conclusión comparando la luminosidad integrada de imágenes de quimioluminiscencia con sus respectivas curvas de liberación de calor.

Corcione *et al.* [49], por su parte, realizaron medidas experimentales obteniendo los espectros de intensidad electromagnética emitida en la combustión. Estos autores observan la presencia de picos correspondientes a los radicales OH^* y CH^* cuando tiene lugar el aumento súbito de la presión. No obstante, Dec y Espey [44] indican que el OH^* no es característico de la fase del autoencendido de la mezcla.

En el capítulo 6 se propone una metodología para el estudio mediante visualización del período del autoencendido de toberas reales de múltiples orificios basada en el registro de la quimioluminiscencia del radical CH^* . La metodología incluye tanto la adquisición como el procesado de las imágenes.

2.4.2.2. Distribución de la temperatura y concentración de productos

El uso de técnicas de visualización con cámaras digitales en los estudios de la combustión Diesel, proporciona mapas de concentraciones de los productos presentes en determinados instantes del proceso. En función de la configuración óptica que se tenga, las imágenes podrán ser un buen indicador cualitativo de la distribución de temperaturas de llama o de la concentración de productos intermedios o finales, como los radicales OH^* , CH^* y el hollín. Con esta información se podrá caracterizar macroscópicamente el chorro reactivo de manera análoga a la del chorro no reactivo.

La temperatura de la llama esta relacionada con diferentes parámetros que son muy importantes en el proceso de combustión. Proporciona información sobre la manera en que se quema el combustible, al igual que da información sobre la formación de los NO_x , que dependen directamente de las altas temperaturas alcanzadas durante el proceso de liberación de calor [50]. Según medidas de Dec y Canaan [51], quienes visualizaron la especie NO con técnicas de fluorescencia inducida por láser, las zonas de la llama donde se presentan las mayores temperaturas se pueden determinar con la visualización de la zona de formación de los óxidos de nitrógeno. La estrategia comúnmente utilizada para la reducción de NO_x , tanto en motores de gasolina como Diesel, consiste en la recirculación de gases de escape, EGR [52].

Por otra parte la distribución de concentración de radicales OH^* esta relacionada con las zonas del frente de llama, envolviendo las zonas pobres en

O₂ que favorecen la formación del hollín [53]. Dec y Coy [46] estudian esta zona de reacción a partir de la fluorescencia inducida del radical OH*. Con la visualización del OH* se calcula la zona de reacción aportando a la medida de la longitud de lift-off.

2.4.2.3. Longitud de Lift-Off

La longitud de lift-off (LOL) se define como la distancia entre el inyector y el inicio de la zona de reacción. La importancia de su estudio se basa en la definición de la zona donde el combustible y aire se encuentran separados sin que se presente aun las condiciones de mezcla para la reacción, debido a la gran velocidad de salida del chorro.

Su estudio se basa en la visualización de la zona de reacción. Larsson [54], por ejemplo, determina la longitud de lift-off con la visualización la radiación térmica del hollín, aunque no sea éste el objetivo principal de su trabajo. Por otro lado Bermúdez *et al.* [20] o Higgins y Siebers [55], entre otros, lo determinan al visualizar, con cámara intensificada, las débiles emisiones de quimioluminiscencia del radical OH*.

Estudios experimentales muestran que la longitud de lift-off depende de parámetros tales como la velocidad de inyección, la temperatura y densidad del aire o la concentración de oxígeno. La información que proporciona está relacionada con la cantidad de aire disponible para la combustión. Cuanto mayor sea la longitud de lift-off mayor será cantidad de aire englobado por el chorro y, por lo tanto, menor cantidad de hollín será producido en el proceso final.

2.5. Resumen

En el presente capítulo se ha realizado una descripción resumida de las fases del proceso de inyección-combustión Diesel y de los complejos fenómenos tanto físicos como químicos que allí ocurren. Esta información facilita la interpretación de imágenes digitales fruto de la visualización de los procesos con las metodologías propuestas en el trabajo de tesis. Las imágenes contienen información importante para la caracterización de los fenómenos, ya que son el registro de la radiación electromagnética producto de la interacción radiación-materia (absorción, dispersión, emisión natural térmica o de quimioluminiscencia, etc.), que ocurre en las diferentes fases del proceso.

Para resumir el capítulo, se integra en la figura 2.2, la definición tradicional de las fases del proceso de combustión (ver § 2.2) con la descripción

esquemática de las diferentes fases del proceso según se van sucediendo cada uno de los fenómenos explicados en el desarrollo del capítulo. Los esquemas fueron presentados por Dec [43] en el desarrollo de su modelo conceptual y representan la sección en el plano central del chorro para diferentes instantes de tiempo. Los esquemas se superponen a la tasa de liberación de calor, centrándose en el intervalo de tiempo donde existe aporte de combustible.

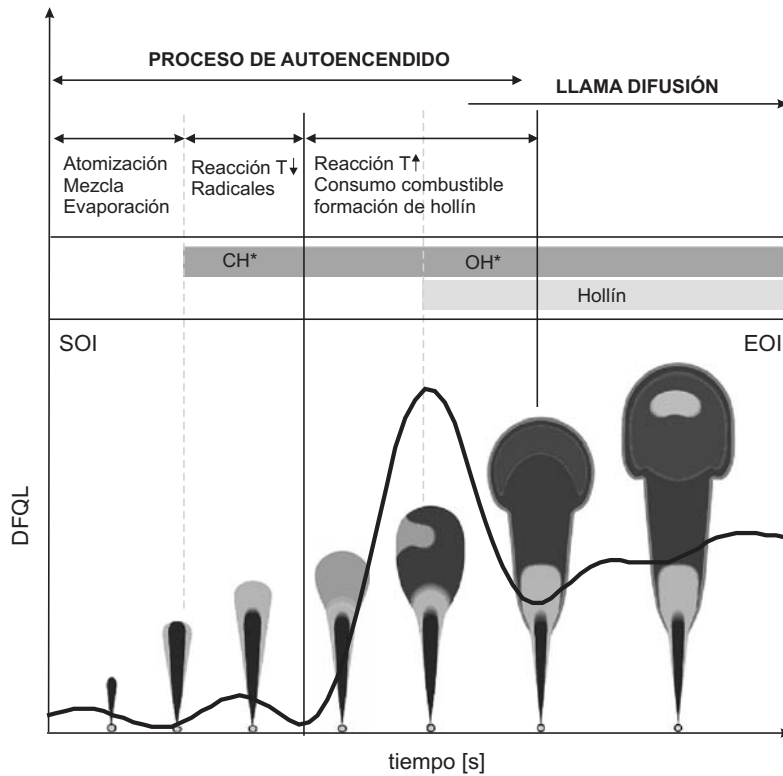


Figura 2.2: Descripción esquemática de la secuencia de sucesos ocurridos durante el proceso de inyección-combustión Diesel. Imagen cortesía de García [56] con esquemas de chorros tomados de Dec [43].

Con el inicio de la inyección, el combustible líquido sale del inyector y comienza a atomizarse, aumentando la superficie de contacto del combustible con el aire. Las gotas de combustible penetran en un ambiente de elevada densidad, englobando aire al interior del chorro y aumentando su temperatura. Alcanzadas las condiciones apropiadas se empiezan a observar regiones donde las gotas comienzan a evaporarse en los alrededores del chorro. Las gotas de combustible líquido continúan penetrando en la cámara de combustión hasta alcanzar la longitud líquida máxima. A partir de este momento el chorro conti-

nua penetrando y englobando aire, pero ya sólo en fase vapor. Estos fenómenos se presentan inicialmente sin ningún tipo de actividad química, por lo que no se presenta emisión de radiación natural. Para su estudio será necesario utilizar fuentes externas y estudiar la interacción tanto del combustible líquido como de las moléculas de vapor con la fuente incidente.

Pasado cierto tiempo se forma una mezcla rica que alcanza unas condiciones favorables para que se de inicio a la primera fase de baja temperatura del período de autoencendido. En las zonas de vapor comienzan a observarse débiles emisiones de radiación atribuida principalmente a la quimioluminiscencia del radical CH^* .

La intensidad en la radiación aumenta como consecuencia del aumento en la temperatura y el consumo de mezcla aire-combustible. Debido al alto consumo de combustible se observa una gran producción tanto de especies finales como precursoras del hollín. El hollín, componente principal del material particulado generado en el proceso de combustión Diesel [57], comienza a formarse cerca del máximo característico de la ley de liberación de calor, inicialmente como partículas muy pequeñas en la zona frontal del chorro hasta consolidarse en los límites de la llama de difusión. La radiación del hollín producida por la incandescencia de las partículas, presenta órdenes de magnitud muy por encima de la emisión quimioluminiscente y son estas partículas las que ocupan la sección principal del chorro. Igualmente, tienen un valor importante las emisiones de quimioluminiscencia de los radicales OH^* que envuelven la zona de hollín, definiendo el frente de la llama de difusión. Estos productos intermedios presentan picos máximos en condiciones de alta temperatura y dosado estequiométrico.

En la fase de difusión tardía, la estructura de la llama toma una forma más aleatoria y la combustión va perdiendo intensidad hasta que termina durante la carrera de expansión.

Bibliografía

- [1] Armas O. *Diagnóstico experimental del proceso de combustión en motores Diesel de inyección directa*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1998.
- [2] Tinaut F.V. *Contribución al estudio del proceso de combustión en motores de encendido por compresión de inyección directa*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1986.
- [3] Lapuerta M., Armas O. y Hernández J.J. “Diagnosis of DI Diesel combustion from in-cylinder pressure signal by estimation of mean thermodynamic properties of the gas”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 19, pp. 513–529, 1999.
- [4] Lapuerta M. *Un modelo de combustión fenomenológico para un motor Diesel de inyección directa rápido*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1988.
- [5] Payri R., Salvador F.J., Gimeno J. y Zapata L.D. “Diesel nozzle geometry influence on spray liquid-phase fuel penetration in evaporative conditions”. *Fuel*, Vol. 87, pp. 1165–1176, 2008.
- [6] Payri F., Benajes J., González C.A. y Donde R. “The effects of injector hole convergence on diesel combustion and emissions”. *Internal Journal of Vehicle Design*, Vol. 36, pp. 385–402, 2004.
- [7] Pastor J.V., Juliá J.E., Zapata L.D. y Buitrago J.E. “Visualización y procesado digital de imágenes para la caracterización macroscópica del chorro diesel isoterma”. *XV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Cádiz*, 2002.
- [8] Pastor J.V., Payri R., López J.J. y Juliá J.E. “Effect of injector nozzle geometry of diesel engines on the macroscopic spray characteristics by means of optical techniques”. *Fuel injection Systems Conference, IMechE*, 2003.
- [9] Gimeno J. *Desarrollo y aplicación de la medida del flujo de cantidad de movimiento de un chorro Diesel*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2008.
- [10] Salvador 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, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003.
- [11] González C.A. *Estudio de la influencia de la geometría de la tobera de inyección en la combustión y emisión de contaminantes de un motor diesel*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2005.
- [12] Hiroyasu H. y Arai M. “Structures of fuel spray in diesel engines”. *SAE paper 900475*, 1990.
- [13] Heywood J.B. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill, Inc. ISBN 0-07-028637-X, 1988.
- [14] Lee C.S. y Reitz R.D. “Effect of liquid properties on the breakup mechanism of high-speed liquid drops”. *Atomization and Sprays*, Vol. 11, pp. 1–19, 2001.
- [15] Hatori H., Narumiya K., Tsue M. y Kadota T. “Photographical analysis of initial breakup process of diesel spray”. *Conference on thermo- and Fluid dynamic processes in diesel engines (THIESEL)*, pp. 33–43, 2002.
- [16] Arrègle J. *Análisis de la estructura y dinámica interna de chorros diesel*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1997.
- [17] Correas D. *Estudio teórico-experimental del chorro libre diesel isoterma*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1998.
- [18] Pastor J.V. *Estudio experimental del movimiento del aire en un motor diesel de inyección directa mediante anemometría laser doppler*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1996.
- [19] Siebers D.L. “Liquid-phase fuel penetration in diesel sprays”. *SAE paper 980809*, 1998.
- [20] Bermúdez V., García J.M., Juliá E. y Martínez S. “Engine with optically accessible cylinder head: A research tool for injection and combustion processes”. *SAE paper 2003-01-1110*, 2003.
- [21] Bosch W. “The fuel rate indicator: A new measuring instrument for display of the characteristics of individual injection”. *SAE paper 660749*, 1966.

-
- [22] Desantes J.M., Payri R., Salvador F.J. y Gimeno J. “Measurements of spray momentum for the study of cavitation in diesel injection nozzles”. *SAE paper 2003-01-0703*, 2003.
- [23] Naber J.D. y Siebers D.L. “Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays”. *SAE paper 960034*, 1996.
- [24] Arrègle J., Pastor J.V. y Ruiz S. “The influence of injection parameters on diesel spray characteristics”. *SAE paper 1999-01-0200*, 1999.
- [25] Dent J.C. “A basis for the comparison of various experimental methods for studying spray penetration”. *SAE paper 710571*, 1971.
- [26] Hay N. y Jones P.L. “Comparison of the various correlations for spray penetration”. *SAE paper 720776*, 1972.
- [27] Benajes J., Payri R., Molina S. y Soare V. “Investigation of the influence of injection rate shaping on the spray characteristics in a diesel common rail system equipped with piston amplifier”. *ASME Journal of fluids engineering*, Vol. 127, pp. 1102–1111, 2005.
- [28] Reitz R.D. y Bracco F.V. “Mechanism of atomization of a liquid jet”. *Physics Fluids*, Vol. 25, pp. 1730–1742, 1982.
- [29] Dan T., Yamamoto T., Senda J. y Fujimoto H. “Effect of nozzle configuration for characteristics of non-reacting diesel fuel sprays”. *SAE paper 970355*, 1997.
- [30] Payri F., Desantes J.M. y Pastor J.V. “LDV measurements of the flow inside the combustion chamber of a 4-valve D. I. diesel engine with axisymmetric piston-bowls”. *Experiments in fluids*, Vol. 22, pp. 118–128, 1996.
- [31] Kuniyoshi H., Tanabe H., Sato G.T. y Fujimoto H. “Investigation on the characteristics of diesel fuel spray”. *SAE paper 800968*, 1980.
- [32] Cho I.Y., Fujimoto H., Kuniyoshi H., Ha J.Y., Tanabe H. y Sato G.T. “Similarity law of entrainment into diesel spray and steady spray”. *SAE paper 900447*, 1990.
- [33] Cossali G.E., Brunello G. y Coghe A. “LDV characterization of air entrainment in transient diesel sprays”. *SAE paper 910178*, 1991.
- [34] Siebers D.L. “Scaling liquid-phase fuel penetration in diesel sprays based on mixing-limited vaporization”. *SAE paper 1999-01-0528*, 1999.

- [35] López J.J. *Estudio teórico-experimental del chorro libre diesel no evaporativo y de su interacción con el movimiento de aire*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003.
- [36] Lefebvre A.H. *Atomization and sprays*. Hemisphere Publishing Corporation, ISBN 0-89116-603-3, 1989.
- [37] Hiroyasu H. y Kadota T. “Fuel droplet size distribution in diesel combustion chamber”. *SAE paper 740715*, 1974.
- [38] Koo J.Y. y Martin J.K. “Droplet sizes and velocities in a transient diesel fuel spray”. *SAE paper 900397*, 1990.
- [39] Soare V.T. *Phase doppler measurement in diesel dense sprays: optimisation of measurements and study of the orifice geometry influence over the spray at microscopic level*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2007.
- [40] Tinaut F.V., Melgar A., Castro F., Sánchez M.L. y Giménez B. “A method to determine liquid concentration in non-stationary axisymmetric sprays”. *Experiments in Fluids*, Vol. 23, pp. 299–305, 1997.
- [41] Baritaud T.A., Heinze T.A. y le Coz J.F. “Spray and self-ignition visualization in a D.I. diesel Engine”. *SAE paper 940681*, 1994.
- [42] Higgins B., Siebers D. y Aradi A. “Diesel-spray ignition and premixed-burn behavior”. *SAE paper 2000-01-0940*, 2000.
- [43] Dec J.E. “A conceptual model of DI diesel combustion based on laser-sheet imaging”. *SAE paper 970873*, 1997.
- [44] Dec J.E. y Espey C. “Chemiluminescence imaging of autoignition in a DI diesel engine”. *SAE paper 982685*, 1998.
- [45] Dec J.E. y Espey C. “Ignition and early soot formation in a DI diesel engine using multiple 2-D imaging diagnostics”. *SAE paper 950456*, 1995.
- [46] Dec J.E. y Coy E.B. “OH radical imaging in a DI diesel engine and the structure of the early diffusion flame”. *SAE paper 960831*, 1996.
- [47] Zhao H. y Ladommatos N. *Engine combustion instrumentation and diagnostics*. Society of Automotive Engineers, ISBN 0-7680-0665-1, 2001.

-
- [48] Edwards C.F., Siebers D. y Hoskin D.H. “A study of the autoignition process of a diesel spray via high speed visualization”. *SAE paper 920108*, 1992.
- [49] Corcione F.E., Costa M., Vaglieco B.M. y de Maio A. “The role of radical species in diesel engine auto-ignition detection”. *SAE paper 2001-01-1003*, 2001.
- [50] Desantes J.M., Lapuerta M. y Salavert J.M. “Study on independent effects of diesel engine operating conditions on nitric oxide formation and emissions through schematical combustion simulation”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 210, pp. 71–80, 1996.
- [51] Dec J.E. y Canaan R.E. “PLIF imaging of NO formation in a DI diesel engine”. *SAE paper 980147*, 1998.
- [52] Lapuerta M., Hernandez J.J. y Gimenez F. “Evaluation of exhaust gas recirculation as a technique for reducing diesel engine NO_x emissions”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 214, pp. 85–93, 2000.
- [53] Siebers D.L., Higgins B. y Pickett L. “Flame lift-off on direct-injection diesel fuel jets: Oxygen concentration effects”. *SAE paper 2002-01-0890*, 2002.
- [54] Larsson A. “Optical studies in a DI diesel engine”. *SAE paper 1999-01-3650*, 1999.
- [55] Higgins B. y Siebers D. “Measurement of the flame lift-off location on DI diesel sprays using OH chemiluminescence”. *SAE paper 2001-01-0918*, 2001.
- [56] García J.M. *Aportaciones al estudio del proceso de combustión turbulenta de chorros en motores diesel de inyección directa*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2004.
- [57] Lapuerta M., Martos F. y Herreros J.M. “Effect of engine operating conditions on the size of primary particles composing diesel soot agglomerates”. *Journal of Aerosol Science*, Vol. 38, pp. 455–466, 2007.

Capítulo 3

Visualización de los procesos de inyección y combustión: Técnicas y herramientas

Contenido

3.1. Introducción	41
3.2. Técnicas de visualización en MCIA	42
3.2.1. Visualización de la formación del chorro	43
3.2.2. Visualización de la combustión	47
3.3. Sistemas de medida	50
3.3.1. Sistemas de adquisición	51
3.3.1.1. Fotorreceptores puntuales	52
3.3.1.2. Cámaras digitales	53
3.3.2. Sistemas de iluminación	57
3.3.3. Sistemas de sincronización	60
3.4. Instalaciones experimentales	61
3.4.1. Maquetas de inyección y motores ópticos	61
3.4.2. Maquetas isotermas de SF ₆ y N ₂	64
3.4.3. Motor-maqueta	65
3.4.4. Motor óptico transparente	68
3.5. Análisis de imágenes del chorro Diesel	69
3.5.1. Procesado digital de imágenes	69
3.5.2. Algoritmos de segmentación de chorro Diesel	73
3.6. Resumen	75

Bibliografía 78

3.1. Introducción

El estudio experimental de la combustión Diesel mediante el uso de técnicas de visualización, en combinación con otras metodologías experimentales, ha servido durante años al desarrollo de los MCIA. Estas proporcionan información que permite mejorar la comprensión de los complejos fenómenos físico-químicos involucrados en el proceso de combustión, como la inyección de combustible, la formación de la mezcla y la formación de especies intermedias o finales. La información que producen, tanto cuantitativa como semicuantitativa, sirve de base al desarrollo de modelos fenomenológicos y de cálculo CFD (Computational Fluid Dynamics), los cuales una vez ajustados y validados, permiten predecir y analizar los complejos procesos involucrados y estimar magnitudes no accesibles desde el punto de vista experimental.

El gran desarrollo de las técnicas ópticas de medida y visualización, se ha dado gracias a los avances tecnológicos en diversos campos, especialmente en óptica, electrónica e informática. Se han podido desarrollar equipos capaces de medir algunos parámetros físicos locales del fluido de manera precisa, mediante el registro de señales luminosas que pueden ser traducidas en imágenes. Los sistemas de captación de imagen están provistos de dispositivos con tecnología tipo CCD o CMOS, en algunas ocasiones provistos de intensificadores. Cuando se requiere iluminación externa, existen fuentes de radiación láser, flash de corta duración o fuentes continuas de gran intensidad, especialmente importante cuando se usan cámaras ultrarrápidas.

La visualización de los procesos se suele llevar a cabo en entornos experimentales simplificados que permiten reproducir en cierta medida las condiciones termodinámicas de densidad, presión y temperatura de un motor real. Debido a la conveniencia de analizar por separado los procesos físicos y químicos presentes en los procesos de inyección-combustión, tradicionalmente se suele recurrir al estudio de chorros inyectados en atmósferas inertes, para el estudio del proceso de mezcla, controlando la temperatura según se den condiciones evaporativas o no. En condiciones reactivas es posible, por lo tanto, visualizar el autoencendido y la formación y desarrollo de la llama de difusión.

En el proceso de visualización se produce un gran número de imágenes digitales de los diferentes estados del chorro y el proceso de combustión. La única forma de analizar convenientemente esta gran cantidad de información es mediante sistemas informáticos de procesado automático.

El capítulo comienza con una breve descripción de diferentes técnicas de visualización empleadas en el estudio experimental de los fenómenos mencionados en el capítulo anterior. Posteriormente presentan las generalidades de

los equipos de adquisición y demás instrumental utilizado en los estudios de este trabajo. Se describen igualmente las instalaciones donde se ha visualizado y las generalidades de los algoritmos para análisis de las imágenes de los procesos de inyección y combustión en motores Diesel.

3.2. Técnicas de visualización en MCIA

Las técnicas de visualización constituyen hoy en día una de las principales herramientas experimentales de investigación en el campo de los MCIA. Estas metodologías se caracterizan por ser muy sensibles a pequeñas variaciones de los parámetros físicos locales del fluido y a las emisiones debidas a las reacciones químicas del proceso de combustión. La información que proporcionan se caracteriza por una elevada resolución espacial y/o temporal, aunque están claramente limitadas por las características de los fenómenos a medir: la corta duración de los procesos (del orden de unos pocos milisegundos), las dificultades de acceso óptico al lugar donde se lleva a cabo la combustión, los altos gradientes de temperatura y presión, la baja intensidad de luz emitida en algunos procesos, etc.

Las técnicas de visualización aportan imágenes de los procesos de inyección y combustión, tanto por el registro de la emisión de radiación propia del fenómeno de estudio como por la interacción radiación-materia del chorro con una fuente de luz externa [1]. Estas fuentes de iluminación pueden ser desde fuentes tipo láser hasta lámparas de gran intensidad. Las técnicas que utilizan fuentes láser requieren equipamientos más sofisticados y costosos, que las que utilizan fuentes tipo flash, y sólo pueden aplicarse en entornos experimentales simplificados. No obstante, su interés radica en la monocromaticidad, coherencia y direccionalidad de la radiación requerida en determinadas aplicaciones. Esta última propiedad hace posible, por ejemplo, la generación de láminas especiales para estudios tomográficos de una determinada muestra.

La radiación natural emitida en el proceso de combustión puede ser *incandescente* o *luminiscente*. En la primera, también conocida como *radiación térmica*, la emisión de luz de alta intensidad, se debe a la liberación de energía cuando un cuerpo supera cierta temperatura característica. Ejemplo de ello se observa en llamas Diesel cuando el hollín alcanza temperaturas superiores a los 1300 K [2]. La emisión de energía térmica en el espectro electromagnético se describe por la ley de Planck, predominando en el rango visible y en el infrarrojo cercano.

En la luminiscencia, por el contrario, la emisión de radiación puede producirse en condiciones de baja temperatura. Se define como el proceso de emisión

espontáneo de un fotón al producirse la desexcitación de una molécula. Si el proceso de excitación molecular se deriva de una reacción química, el proceso luminiscente se define como *Quimioluminiscencia*. Por otro lado, si la fuente energética que causa la excitación molecular es de origen electromagnético, el proceso será *Fotoluminiscente* en el cual se incluye la *Fluorescencia*. La fluorescencia es una propiedad que se observa en ciertas sustancias de los combustibles comerciales como los compuestos aromáticos, cuando se iluminan con una radiación láser altamente energética [3, 4].

Es posible realizar la clasificación de las técnicas ópticas utilizadas en el estudio de los MCIA desde varios puntos de vista. Una posibilidad estaría relacionada con los diferentes tipos de interacción radiación-materia en la cual se basa la técnica de medida, como presenta Pastor [5]. Sin embargo, atendiendo a la estructura que se ha querido dar a la tesis doctoral, se ha optado por realizar una clasificación según el proceso o fenómeno físico-químico a estudiar. De esta forma, en los siguientes subapartados se presenta una introducción de las técnicas ópticas según sean utilizadas en el estudio del proceso de inyección y evaporación de combustible o según se estudie el proceso de combustión.

3.2.1. Visualización de la formación del chorro

Las técnicas que permiten profundizar en el conocimiento de la física de la formación del chorro, son metodologías tanto del tipo dispersivas, basadas en la teoría de Lorenz Mie de la dispersión de luz por pequeñas partículas [6, 7], como técnicas que se basan en las variaciones del índice de refracción que se produce en el seno de un fluido debido a cambios en sus propiedades físicas. Estas técnicas se pueden dividir según el tipo de fuente utilizada para la iluminación y según la interacción de la radiación sea con gotas de combustible líquido o con moléculas de combustible evaporado.

Dispersión en régimen de Mie

La dispersión en régimen de Mie es la interacción de luz de tipo elástico con partículas de diámetro mayor que la longitud de onda de la radiación incidente [6]. Se visualiza entonces la luz dispersada por las gotas y los ligamentos de combustible líquido. Atendiendo a la forma como se ilumina, puede hacerse la siguiente distinción:

- **Iluminación mediante lámina láser:** En esta técnica el chorro se ilumina con una fina lámina láser. Se registran la señal de la luz dispersada en régimen de Mie mediante el uso de un fotorreceptor ubicado

normalmente en un plano paralelo, proporcionando información de una porción del chorro mediante la obtención de imágenes tomográficas. La información que se puede extraer del chorro, mediante la aplicación de esta técnica, se limita a información cualitativa de la distribución de combustible [8], medidas geométricas del chorro y análisis de la existencia de ligamentos y estructuras internas [9–11]. Debido a la naturaleza de la metodología, se requiere para su aplicación una configuración especial de accesos ópticos que permitan la iluminación del chorro en la dirección de su eje, limitando en muchas ocasiones al estudio de un solo chorro. Un ejemplo de ello se encuentra el trabajo de Espey y Dec [12] quienes utilizaron el acceso lateral de un motor de pistón transparente para el estudio de toberas reales de múltiples orificios.

- **Dispersión de luz de amplio espectro:** Para resolver el problema de la visualización de chorros en toberas reales de múltiples orificios, se han propuesto múltiples configuraciones de iluminación y distribución del equipamiento óptico. Con el uso de fuentes de iluminación tipo flash (descarga rápida e intensa de luz de amplio espectro, generalmente con lámparas de Xenón) es posible iluminar el lugar donde se lleva a cabo el evento de inyección, a través de amplios accesos ópticos o por medio de fibras ópticas. Con la visualización se obtienen imágenes del evento de inyección tanto en maquetas isotermales como en maquetas reactivas y motores. Las imágenes proporcionan información de la geometría de los diferentes chorros de una misma tobera, como penetración y ángulo, y de la dispersión entre los diferentes chorros. De este tema se darán mayores detalles en el capítulo 4 donde se proponen diferentes configuraciones ópticas para la visualización del chorro líquido.
- **Iluminación trasera difusa:** La técnica de iluminación trasera difusa es una metodología de visualización directa donde el medio de estudio se ilumina con un haz radiante, tipo flash o láser, y la imagen se registra después de que la luz emergente se propague libremente por la cámara donde se inyecta. Se ubica un difusor entre el objeto visualizado (chorro Diesel) y la fuente de radiación, de forma que la cámara registra un fondo homogéneamente iluminado y la sombra de la fase líquida del chorro de combustible, permitiendo estimar diferentes parámetros macroscópicos y microscópicos de éste [8, 13–15].
- **Método de extinción de luz en chorro líquido:** Esta metodología fotométrica, es usada para la detección de la distribución de concentraciones de partículas y se basa en la medida o visualización de la atenuación parcial (absorción y dispersión) del flujo fotónico de un haz de luz

que atraviesa una nube de material particulado. La extinción dependerá, entonces, del diámetro de partícula, de la longitud de la onda incidente λ y del índice de refracción del fluido n [16, 17]. En el estudio del chorro líquido Diesel los fenómenos de absorción de luz suelen ser poco significativos comparados con los de dispersión ya que las gotas de combustible son poco absorbentes [18].

- **Velocimetría de partículas PIV:** Esta técnica permite medir campos de velocidades en el plano de un fluido, generalmente provisto de trazadores [19], cuando se ilumina con una señal pulsada de lámina láser [20]. Las imágenes se registran utilizando técnicas de exposición múltiple y las velocidades instantáneas se obtienen dividiendo el desplazamiento de las partículas entre imágenes sucesivas por el tiempo transcurrido entre dos pulsos. Existen diferentes variantes de la técnica dependiendo del método utilizado para registrar y procesar la información [21]. Su aplicación más extendida en MCIA es el estudio del movimiento del aire en el interior del motor y los estudios sobre el movimiento del aire alrededor del chorro Diesel durante el proceso de formación de mezcla.

Dispersión en régimen de Rayleigh

La dispersión de Rayleigh es la interacción de tipo elástico de la radiación con partículas de tamaño mucho menor que su longitud de onda. La técnica se ha usado con frecuencia para la medida de densidad de gases (y por tanto, su temperatura) en mezclas homogéneas donde la sección eficaz elástica y la presión no varían espacialmente [22]. Debido a la dependencia lineal de la señal de Rayleigh con la densidad y la intensidad del haz láser, la interpretación de los resultados es bastante directa. Dado que los hidrocarburos tienen una sección eficaz de dispersión elástica mucho mayor que la del aire, la intensidad de la señal puede usarse para la medida de la concentración local de combustible evaporado [23, 24]. La señal de Rayleigh es unos 10 órdenes de magnitud menor que la de Mie, por lo que resulta fuertemente afectada por la presencia de partículas grandes y por la luz de fondo, lo que complica notablemente los experimentos.

Fluorescencia inducida por láser

La técnica de fluorescencia inducida por láser LIF, es una metodología dispersiva de visualización de tipo inelástico que tiene como principal aplicación la medida de la concentración local del combustible. La técnica se basa en las

propiedades fluorescentes que presentan algunas moléculas cuando estas absorben energía electromagnética de una determinada frecuencia, adquiriendo un estado inicial de excitación y reemitiendo esta energía en forma de radiación durante la desexcitación [3, 25]. En muchos casos, el chorro se ilumina por medio de una lámina de luz láser para la formación de imágenes tomográficas de la muestra, similar a la visualización de Mie con lámina láser. Esta técnica es conocida como fluorescencia inducida por lámina láser PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence).

Una variante de la técnica, es la de fluorescencia inducida por láser tipo Exciplex LIEF. En la aplicación de la metodología se utiliza un fluido no fluorescente que actúa como disolvente, al que se le añaden trazadores fluorescentes especiales. Cuando el fluido está en fase líquida la concentración de trazadores es alta y estos forman una molécula compleja denominada Exciplex que emite radiación de fluorescencia en cierta longitud de onda. Cuando el fluido está en fase vapor, la concentración de trazadores es mucho menor y, por lo tanto, la probabilidad de formar una molécula Exciplex es también menor. La emisión de fluorescencia es, en este caso, debida a las moléculas de los trazadores, pero en una longitud de onda diferente. Al igual que en las técnicas de LIF para el estudio del chorro líquido, en las de LIEF la iluminación se puede llevar a cabo mediante lámina láser conocido como PLIEF [26–28].

Juliá [4] propone una aplicación completa de las técnicas PLIF para el estudio de las concentraciones en chorros Diesel bifásicos.

Técnicas de visualización Schlieren y Shadowgraph

Las técnicas de Schlieren y Shadowgraph están entre los métodos clásicos de visualización más usados en el estudio de la mecánica de los fluidos, gracias a la relativa simplicidad de la configuración óptica y los altos niveles de sensibilidad que se pueden alcanzar. Su principio de funcionamiento se basa en las variaciones del índice de refracción que se producen en el seno de un fluido debido a cambios en sus propiedades físicas. Cuando un haz de luz colimado (flash o láser) se propaga por un medio, estas variaciones del índice de refracción producen variaciones de fase de la onda electromagnética incidente, con lo que la luz emergente contiene la información de las propiedades del fluido en las líneas de propagación de los rayos [29]. Dado que las variaciones de índice de refracción dependen además de la temperatura del aire, no es posible cuantificar la concentración de combustible, aunque sí obtener información geométrica de la estructura del chorro [30, 31].

La técnica de Schlieren difiere de la de Shadowgraph básicamente en que

en la primera se añade al sistema óptico una lente convergente de modo que se pueda acceder al plano imagen de la fuente y de esta forma realizar un filtrado espacial en el plano de salida del sistema. Con el filtrado se elimina parcial o totalmente la frecuencia espacial cero del plano imagen correspondiente a la luz del fondo, aumentando la sensibilidad. Esta técnica ha sido utilizada por diferentes autores para el estudio de los procesos de inyección y combustión en MCIA como puede apreciarse en [32–34].

En el capítulo 5 se presenta un estudio de aplicación de estas metodologías al estudio de chorros Diesel, tanto de toberas de orificio único como de múltiples orificios. Se evalúan diferentes configuraciones ópticas, como las variantes de Schlieren por transmisión y de doble paso.

3.2.2. Visualización de la combustión

Existen diferentes técnicas de visualización utilizadas en el estudio de los diferentes aspectos del proceso de combustión Diesel. En algunas se registra la señal de quimioluminiscencia de ciertos radicales que aparecen como consecuencia de las reacciones químicas. Otras registran la emisión de radiación cuando las partículas de hollín superan la temperatura de incandescencia natural o cuando se hace incidir una radiación externa tipo láser que induce dicha incandescencia. Las técnicas de fluorescencia inducida son igualmente importantes para la cuantificación de especies mediante la obtención de imágenes tomográficas de NO_x y OH^* .

Visualización de la quimioluminiscencia

La quimioluminiscencia es el fenómeno de emisión natural de radiación electromagnética de baja intensidad que se observa cuando una especie excitada, producto de una reacción química, regresa a su estado fundamental. En la combustión de hidrocarburos, las especies que más contribuyen a la quimioluminiscencia visible y ultravioleta son los radicales C_2 , CH y OH cuyas bandas de emisión principal se centran en los 517 nm, 432 nm y 310 nm respectivamente [35, 36].

Trabajos experimentales reportados en la literatura sobre combustión Diesel muestran que las especies de mayor intensidad observadas en el proceso de autoencendido son el C_2 y el CH . La visualización de estas especies permiten analizar su comportamiento por simple análisis de imágenes con el filtrado espectral adecuado [2, 37]. La técnica proporciona información cualitativa sobre la aparición y evolución, tanto espacial como temporal, del autoencendido,

aunque no es útil durante la combustión por difusión ya que la emisión de radiación por parte de las partículas de hollín es de mayor intensidad y en el mismo rango espectral.

Los radicales OH son productos intermedios de la combustión que dominan en las regiones de más alta temperatura o donde la mezcla aire-combustible se encuentra alrededor de la estequiométrica. Fuera de ellas las condiciones de la mezcla no son apropiadas para que se observen estos radicales, por lo que pueden considerarse como buenos trazadores del frente de llama. En procesos de combustión a baja temperatura, estas regiones son mayores que en los procesos convencionales de motores Diesel de inyección directa a alta temperatura como lo expone Musculus [37], trabajo que es una extensión del modelo convencional de Dec [38].

A diferencia del C_2 y del CH, la quimioluminiscencia del OH, que emite en un ancho de banda inferior a la del hollín incandescente, se puede visualizar durante el proceso de combustión por difusión. La visualización de la emisión natural de quimioluminiscencia del OH es utilizada principalmente para la medida de lift-off, y para el seguimiento del frente del chorro [39]. No obstante, el nivel de intensidad de la radiación puede ser útil para la caracterización temporal de sucesos [40], o como es el caso de Tinaut *et al.* [41], como dato complementario, en la caracterización del proceso de combustión de un gas pobre de gasificación de biomasa, donde se observó que la máxima tasa de liberación de calor coincide con el instante en el que se presenta el valor de mayor intensidad de OH.

Visualización de la radiación térmica del hollín

Desde un punto de vista óptico, una llama visible puede considerarse como una nube de pequeñas partículas a alta temperatura, que produce una radiación térmica de alta intensidad [2]. La intensidad de luz emitida por estas partículas es función de la concentración y temperatura del hollín, y se puede observar transcurrido un cierto tiempo desde el inicio de las primeras reacciones del proceso de autoencendido.

El registro de la señal de incandescencia se puede llevar a cabo por medio de sencillos sistemas de visualización con cámaras digitales simples. La visualización se realiza a través amplios accesos ópticos o accediendo al interior de la cámara de combustión por medio de endoscopios. Como metodología de diagnóstico suele utilizarse junto con otras metodologías de visualización complementarias [42, 43].

Dado que el espectro e intensidad de la llama incandescente depende de la concentración y temperatura del hollín, el registro de la radiación a dos longitudes de onda permite estimar la temperatura de llama (T_{soot}) y el factor KL que determina la absorción de la radiación debida al hollín y que por lo tanto está relacionado con su concentración [44, 45]. Esta técnica se conoce como *pirometría de dos colores* o *método de los dos colores*.

Para la puesta a punto de la técnica, se debe realizar una calibración previa del sistema de visualización que puede estar conformado por cámaras o sistemas de fotodiodo o fotomultiplicador (PD o PMT) [46]. En todos los casos se realiza un filtrado espectral para dos frecuencias diferentes, de modo que se registran solo las longitudes de onda deseadas. Hampson y Reitz [47] realizan un resumen de las longitudes de onda visualizadas por diferentes autores.

Cuando se dispone de una cámara digital provista con arreglos CFA para la construcción del color (ver § 3.3.1), mediante métodos de pre y post-procesado de imágenes, es posible dividir la imagen original de la cámara en formato ‘raw’ en tres imágenes diferentes con información de las longitudes correspondientes al espacio RGB [48]. Zhao y Ladommatos [8] dedican todo un capítulo de su libro al estudio de la teoría de la técnica de 2-colores y de las posibilidades de aplicación en diferentes campos de estudio de la combustión.

Incandescencia inducida por láser

La concentración volumétrica de hollín en llamas puede medirse con la técnica de incandescencia inducida por láser LII. Esta metodología de visualización ha sido utilizada con éxito en la visualización de llamas de combustibles gaseosos [49], en llamas de difusión [50], combustión en motor [43] y en la medida de gases de escape [51]. La técnica se basa en el registro de la incandescencia de las partículas de hollín al hacer incidir sobre ellas una radiación de gran densidad energética (láser) que provoca su calentamiento acelerado hasta temperaturas mucho mayores que las de su entorno (la llama) [52]. Al igual que otras técnicas que utilizan fuentes láser, en la visualización de LII se pueden obtener imágenes tomográficas mediante iluminación con lámina PLII (Planar laser induced incandescence).

El tamaño de las partículas primarias de hollín puede deducirse de la evolución temporal de la señal de LII y el tamaño medio de aglomerados de la medida combinada de LII y Rayleigh. En aplicaciones en el cilindro, la técnica LII proporciona información sobre el crecimiento de las partículas de hollín y su reducción como consecuencia de la oxidación [53], información muy útil para el desarrollo de los todavía imprecisos modelos de formación de hollín.

Una revisión reciente sobre el estado de la técnica y el modelado de partículas de hollín puede encontrarse en [54].

Técnicas LIF para estudios de combustión

Las técnicas de fluorescencia inducida por láser han cumplido un importante papel en el estudio de los procesos de combustión Diesel en la visualización de la concentración de diferentes especies intermedias y productos finales [55]. En estas técnicas, conocidas como LIF específicas, se sintoniza la frecuencia de excitación del láser con transiciones energéticas particulares de la especie a estudiar. A título de ejemplo, la formación de monóxido de nitrógeno NO resulta especialmente interesante por tratarse de uno de los contaminantes más habituales. Dec y Canaan [56] realizaron un estudio de la formación de las moléculas de NO durante el proceso de combustión en un motor de pistón transparente. Estos resultados sirvieron a la ampliación y validación del modelo de chorro Diesel presentado un año antes por uno de los autores [38]. Otros trabajos donde se visualiza la molécula NO con las técnicas de LIF se encuentra en [57, 58].

La visualización de los radicales OH* fue una de las primeras medidas en realizarse con LIF en MCIa debido, principalmente, a su elevada concentración en la llama y la facilidad de detección. Además, es una de las moléculas cuya fluorescencia ha sido más estudiada en otros campos de investigación, lo que ha facilitado tanto el desarrollo e implementación de la técnica como la interpretación y cuantificación de los resultados. La aplicación de la medida de LIF OH* tienen como objetivo fundamental obtener una imagen en el plano del eje del chorro y poder así determinar la frontera real entre las zonas reactivas e inerte [59, 60].

3.3. Sistemas de medida

Gracias al gran desarrollo tecnológico protagonizado tanto por los sistemas de adquisición de imagen e iluminación como por otros sistemas optoelectrónicos, ha sido posible la implementación de diferentes técnicas de visualización al estudio de la inyección y combustión Diesel. En el presente apartado se muestran las características generales de los diferentes tipos de sistemas fotorreceptores y las características generales de los dispositivos utilizados en la implementación de las metodologías propuestas en este trabajo.

3.3.1. Sistemas de adquisición

Los fotorreceptores, cuya función es la de registrar la radiación electromagnética generada en un proceso, son el componente principal de los sistemas adquisición de imagen. Las características técnicas de estos sistemas son los siguientes:

- **Resolución espacial:** Esta es una propiedad determinada por el número y disposición de sensores que componen el fotorreceptor. Una imagen digital adquirida con un sistema de gran resolución espacial, tendrá un mayor número de píxeles y por lo tanto una mayor sensibilidad espacial (permitirá observar mayor número de detalles del campo visualizado).
- **Resolución temporal:** Esta propiedad esta determinada por la frecuencia de registro. A mayor número de imágenes registradas por unidad de tiempo, mayor será la resolución temporal del sistema. La resolución espacial y la resolución temporal suelen estar relacionadas de forma inversa, por limitaciones electrónicas de tiempo de lectura. Un aumento en la resolución temporal suele significar un sacrificio en la resolución espacial y viceversa.
- **Tiempo de Obturación:** El tiempo de obturación es el que define el tiempo activo del sensor de la cámara. Un tiempo corto de obturación evitará el efecto de movimiento registrado en algunas imágenes, aunque el sensor tendrá menos tiempo para el registro de la señal luminosa redundando en una menor sensibilidad.
- **Rango y sensibilidad espectral:** El rango espectral determina cuales son las longitudes de onda del espectro electromagnético que se pueden registrar con los sistemas de adquisición. La sensibilidad espectral, que no es uniforme, indica que tan bien se visualizan las diferentes longitudes del rango espectral. Ambas propiedades están determinadas por las propiedades ópticas de los materiales que conforman los sistemas de adquisición.
- **Rango dinámico:** El rango dinámico es la diferencia entre el valor de nivel máximo y mínimo que un dispositivo puede medir. En los fotorreceptores digitales este se obtiene de la relación 2^b , con b el número de bits de memoria reservados para guardar el valor de nivel digital de un píxel. El número de niveles de intensidad de una imagen están determinados por el rango dinámico, desde el negro absoluto o ausencia de radiación, al nivel de saturación (SL) o exceso de esta.

Los primeros sistemas de adquisición de imágenes utilizados en el estudio de los MCIA, consistían en cámaras de prisma rotativo donde el elemento fotorreceptor era una película fotosensible de 8, 16 o 35 mm [61–63]. Estas cámaras se caracterizaban por contar con una alta resolución temporal, alrededor de los 10000 fps en tiempos mínimos de exposición de solo $33 \mu s$ (pudiendo llegar a 40000 fps reduciendo el tamaño del fotograma). No obstante, para el análisis de resultados, era necesario realizar un costoso proceso de revelado de la película fotosensible, para posteriormente medir sobre las imágenes resultantes.

Con la aparición de los nuevos elementos fotorreceptores electrónicos se ha podido digitalizar la señal de radiación, lo que facilita el análisis de la información con ayuda de herramientas informáticas. Estos nuevos sistemas fotorreceptores pueden ser puntuales o estar dispuestos de forma lineal o bidimensional.

3.3.1.1. Fotorreceptores puntuales

Los fotorreceptores puntuales registran la radiación integrada en un único sensor por lo que no existe resolución espacial. La información resultante será entonces la evolución temporal de la luminosidad con una frecuencia de registro muy alta. Dependiendo de su configuración y sensibilidad, los fotorreceptores puntuales pueden ser fotodiodos (PD) o fotomultiplicadores (PMT).

Un fotodiodo es un semiconductor construido con una unión PN³ sensible a la incidencia de radiación visible o infrarroja. Para su funcionamiento se polariza inversamente la unión PN con lo que se produce una cierta circulación de corriente cuando el fotodiodo es excitado por la luz. Esta se utiliza para medir el cambio de intensidad de la radiación que incide sobre el PD. La mayoría de los fotodiodos están equipados con una lente que concentra la radiación. Las velocidades de respuesta de estos sistemas suelen ser muy altas lo que los convierte en una excelente herramienta de visualización de eventos variables de corta duración como la combustión. Debido a su construcción, los fotodiodos se comportan como células fotovoltaicas, es decir, en ausencia de radiación generan una tensión muy pequeña que recibe el nombre de *corriente de oscuridad* o *ruido de fondo*. Cuanto menor sea el *ruido de fondo* del PD, mayor será su sensibilidad. La investigación aplicada a los sistemas PD se centra especialmente en el desarrollo de células solares económicas y la miniaturización y mejora de los sensores utilizados en los dispositivos CCD y CMOS.

³Dispositivo electrónico de estado sólido formado por la unión de dos semiconductores.

El fotomultiplicador es un tubo de vacío en cuyo interior se encuentra un fotocátodo que emite electrones cuando sobre él inciden niveles bajos de radiación. Un campo eléctrico, cuyo voltaje determina el nivel de ganancia del PMT, acelera estos electrones y los dirige hacia un ánodo o dinodo. La energía de los electrones incidentes, provoca la emisión un número mayor de electrones secundarios que son dirigidos hacia un segundo dinodo (ver figura 3.1). El número de dinodos y su disposición varía con el modelo de fotomultiplicador. El rango de medida de un sistema PMT se encuentra entre el UV cercano y el IR cercano. Tiene una velocidad alta de respuesta al estímulo fotónico del orden de nanosegundos manteniendo un nivel de ruido aceptable. Su principal aplicación en motores se halla en el registro de eventos luminosos de baja intensidad como la emisión de quimioluminiscencia [40].

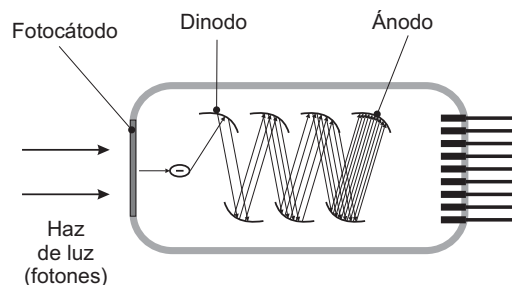


Figura 3.1: Esquema de funcionamiento del PMT: la débil radiación incide sobre un fotocátodo que emite electrones cuyo número se intensifica según la ganancia.

Con el gran desarrollo de los actuales dispositivos CCD y CMOS de gran velocidad y eficiencia cuántica (porcentaje de fotones que deben chocar con la superficie fotorreactiva para producir un par electrón hueco), los PD y PMT han visto reducir enormemente su campo de aplicación. No obstante, en el campo de los motores Diesel, siguen siendo una herramienta importante de diagnóstico gracias a su gran resolución temporal. Ejemplo de ello es el uso de un sistema simple de fotodiodo utilizado por Pickett y Siebers [64] en la realización de medidas puntuales en el estudio de concentraciones de hollín mediante la técnica de extinción de luz.

3.3.1.2. Cámaras digitales

Las cámaras digitales son sistemas provistos de un arreglo o matriz de fotorreceptores electrónicos puntuales dispuestos tanto de forma lineal como bidimensional.

Las cámaras lineales o vectoriales, fueron inicialmente utilizadas para estudiar el desarrollo de chorro Diesel con una aceptable resolución temporal, pero a diferencia de los sistemas puntuales, ganando en resolución espacial. Con la disposición lineal se estudió la repetitividad entre inyecciones visualizando con una frecuencia cercana a los 60000 fps, suficiente para estudiar un evento completo de inyección-combustión [15, 65].

Los arreglos bidimensionales son fotorreceptores provistos con varios millones de sensores que aumentan la resolución espacial del sistema de visualización. De esta forma es posible visualizar mayor número de detalles de una muestra mediante la obtención de imágenes. La desventaja de tener un número muy alto de píxeles, es el mayor tiempo requerido por el sistema para descargar y digitalizar la información.

Diferenciando en la tecnología empleada en la fabricación del fotorreceptor, las cámaras digitales son primordialmente CCD o CMOS.

- Un fotorreceptor tipo CCD [66] (del inglés Charge Coupled Device, o dispositivos de carga eléctrica interconectados, en el idioma castellano) es un circuito integrado que contiene un número determinado de condensadores fotosensibles acoplados [67]. Bajo el control de un circuito interno, cada condensador tiene la propiedad de generar impulsos eléctricos de distinta intensidad en función de la cantidad de radiación que incide sobre él. El impulso eléctrico es transferido a uno o a varios de los condensadores que están a su lado en el circuito. Al final de la exposición los electrones generados por cada detector individual (píxel en la imagen) son transferidos por una variación cíclica de un potencial eléctrico aplicada sobre bandas de semiconductores horizontales y aisladas entre sí por una capa de dióxido de silicio (SiO_2). De este modo el CCD se lee línea a línea aunque los diseños existentes sean numerosos en la disposición de la descarga [68].
- La tecnología CMOS (del inglés Complementary Metal Oxide Semiconductor o Semiconductor complementario del óxido de metal) ha sido durante años la alternativa digital a los CCD gracias a su menor consumo de energía y mayor velocidad de transferencia. A diferencia de los dispositivos CCD, los CMOS incluyen el conversor digital en el propio arreglo de sensores y se incorpora un amplificador de la señal eléctrica en cada sensor, sistema conocido como APS (Active Pixel Sensor). Mientras que en un CCD, la señal eléctrica producida por cada sensor, se envía al exterior y desde allí se amplifica y digitaliza. Gracias al sistema APS es posible leer directamente la señal de cada sensor con lo que se

soluciona el problema conocido como ‘blooming’ (por el que la recepción de una gran intensidad lumínica en un punto influye en los píxeles adyacentes) o ‘smear’ (sensibilización del sensor en tiempo de descarga) [69]. La desventaja del CMOS es que entre los fotorreceptores se encuentra mucha electrónica que no es sensible a la luz, por lo que ha sido necesario aumentar la densidad de integración de los sensores e implementar microlentes que concentren la radiación en la celda fotosensible.

Tanto los sistemas CCD como CMOS se vienen desarrollando desde los años 60’s, no obstante es solo hasta finales de la década de los 90’s cuando los sensores CMOS llegan a ser competitivos al lograr el desarrollo actual que le permite solventar las desventajas presentadas frente a los CCD, superando a estos en velocidad de adquisición. Primero Fossum [70] y Carlson [71] y luego Bigas *et al.* [72] realizan un interesante estudio del estado del arte de estos sistemas donde quedan claras las ventajas y desventajas de cada uno y la dirección de la investigación y del desarrollo, especialmente en la visualización de alta velocidad. Tal es el aumento en la frecuencia de adquisición que Hijazi y Madhavan [68] presentan un novedoso sistema de cámaras UHSC⁴ con el cual se alcanzan frecuencias de 200 MHz con un arreglo especial de cuatro grupos de sensores.

Para mejorar las prestaciones de los sistemas de adquisición de imagen se han desarrollado diferentes dispositivos adicionales a los fotorreceptores digitales. Es el caso de los sistemas intensificadores y los arreglos de filtros de color.

- **Intensificadores:** Estos sistemas se han diseñado para mejorar la sensibilidad de los sistemas de adquisición en condiciones de baja intensidad de radiación. Su principio de funcionamiento se resume en la figura 3.2. Análogamente a los PMT, en los intensificadores la radiación atraviesa una ventana, generalmente de cuarzo, con un amplio rango espectral (entre el UV y el IR cercanos). Un fotocátodo cercano a la ventana, percibe la señal luminosa y la convierte en señal eléctrica que será luego amplificada por un acelerador de electrones MCP (Micro-Channel Plate). La aceleración de electrones se consigue gracias a un potencial eléctrico inducido entre el fotocátodo y el MCP. El nivel de potencial eléctrico determina la ganancia del sistema, aunque aumenta la señal de ruido térmico en la imagen. Los fotoelectrones acelerados impactan sobre una pantalla de fósforo que convierte la señal eléctrica de nuevo en una señal

⁴Se hace referencia a los sistemas de cámaras ultra rápidas UHSC (Ultra-High Speed Cameras) aquellas con frecuencias de adquisición superiores a 1 MHz (1000000 fps).

luminosa registrada por el fotorreceptor [73]. Los sistemas formados por cámaras CCD o CMOS acopladas a intensificadores, suelen denominarse sistemas ICCD e ICMOS respectivamente. Los principales desarrollos en sistemas intensificados, se centran en el diseño de aceleradores de electrones más eficientes y pantallas de fósforo más rápidas y sensibles. En el presente trabajo este tipo de cámaras han sido de gran utilidad en la visualización de las débiles emisiones de quimioluminiscencia. En otros trabajos, se han usado en la visualización de chorros Diesel con técnicas LIF [4].

- **Arreglos de filtros de Color (CFA):** Los fotorreceptores digitales son sensores fotosensibles que registran la intensidad de una señal luminosa dentro de un rango espectral de medida. Esto significa que son sistemas que no permiten discriminar entre colores por lo que el resultado de la visualización son imágenes monocromáticas que comúnmente se representan en escala de grises o falso color. Buscando una analogía con el sistema visual humano [74], los diferentes desarrolladores de sistemas de visión artificial apostaron por anteponer al arreglo de fotosensores un arreglo CFA (Color Filter Array) para obtener la información del color. El más utilizado actualmente es el *arreglo de Bayer* que consiste en una malla cuadrículada de filtros rojos, verdes y azules que componen los colores primarios de la imagen digital (espacio RGB). Este tipo de arreglo está formado en un 50 % de filtros verdes y un 25 % para cada uno de los dos colores restantes, rojo y azul. La disposición de los colores suele ser rojo-verde-rojo en las filas impares, y verde-azul-verde en las filas pares como puede apreciarse en la figura 3.3. Los algoritmos para la interpretación y construcción de las imágenes digitales en color son muy variados. Muestra de ello son el gran número de trabajos desarrollados en los últimos años donde un par de buenos ejemplos se pueden encontrar en las publicaciones de Lukin y Kubasov [75] y Lukac *et al.* [76]. El algoritmo más elemental es el que construye tres matrices diferentes cada una con la información del componente primario del color (RGB), mediante la interpolación de los píxeles vecinos de una imagen que contengan la información de dicho color. En el próximo capítulo se tratará con mayor detalle este tipo de algoritmos utilizados en el procesado de las imágenes en color de este trabajo.

En la tabla 3.1 se resumen las principales propiedades de los sistemas de adquisición utilizados en el registro de las imágenes del presente trabajo. Los más usados en esta tesis, han sido los sistemas CCD intensificados y no intensificados. Las cámaras rápidas con sensores CMOS, han sido adquiridas

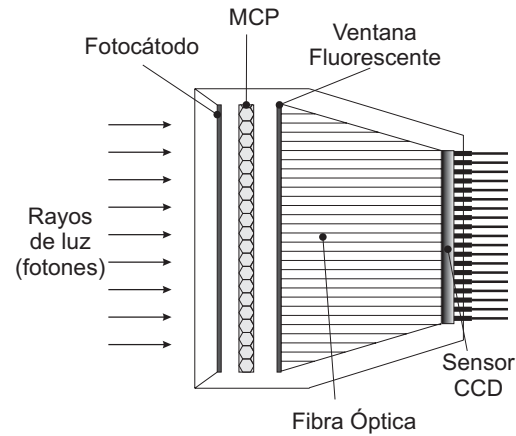


Figura 3.2: Sección del intensificador de una cámara ICCD.

solo al final del trabajo de tesis.

3.3.2. Sistemas de iluminación

Los sistemas de iluminación de mayor uso en la visualización con técnicas ópticas son los sistemas láser, luces estroboscópicas o flash y las fuentes continuas de gran intensidad [77].

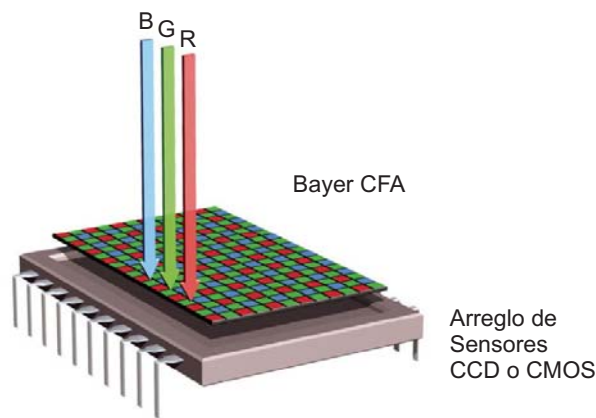


Figura 3.3: Arreglo de filtros de color tipo Bayer: los filtros se superponen al arreglo de sensores CCD o CMOS.

Las características básicas de las fuentes láser son su altísima densidad de energía, la monocromaticidad y la coherencia espacial y temporal (relación de fase constante). Las fuentes de luz estroboscópica y las fuentes continuas son fuentes policromáticas, normalmente con un rango de emisión en el espectro visible por lo que suelen denominarse fuentes de luz blanca. Las fuentes de luz continua cobran importancia en la visualización con cámara ultrarrápidas donde las fuentes flash, de mayor intensidad que las fuentes continuas, no sirven a los propósitos de la iluminación, por el tiempo de espera requerido entre disparos.

Las imágenes del presente trabajo, tanto en la visualización del chorro líquido del capítulo 4 como en la visualización con técnicas Schlieren del capítulo 5, se han adquirido iluminando con una fuente estroboscópica de gas de Xenón de alta intensidad (PerkinElmer modelo MVS 7010) caracterizada por generar un pulso de corta duración con un retraso intrínseco de 10 μ s.

Tabla 3.1: Características técnicas de las cámaras digitales utilizadas en la visualización del chorro Diesel.

Propiedad	PixelFly	SensiCam	DynaMight	FastCam APX – APX-i2
Sensor	CCD	CCD	ICCD	CMOS – ICMOS
Color (CFA)	SI	NO	NO	NO
Res. Espacial máxima [píxeles]	1280 x 1024	1280 x 1024	512 x 512	1024 x 1024 a 2000 fps
Resolución Temporal [fps]	12,5 Máx. Res.	8 Máx. Res.	0,5 Máx. Res.	120000 128 x 16 pix.
Obturación mínima [μ s]	10,0	0,1	0,1	4,0
‘Smear’	SI	SI	NO	NO
Rango espectral [nm]	400-700 espacio RGB	280-1000	190-800	210-800
Rango dimámico ‘RAW’ [bits]	12	12	16	10
nivel digital	0-4095	0-4095	0-65535	0-1024
Dimensiones Aprox. [mm]	39x39x66	93x78x210	187x124x142	120x110x113 142x124x142

Las propiedades del flash han sido evaluadas con el objetivo de determinar su repetitividad y la forma de la curva de descarga de la lámpara. Para ello se registraron diferentes disparos del flash con un sistema PD con una frecuencia de registro alta. La figura 3.4 muestra como ejemplo tres repeticiones registradas por el PD para tres disparos consecutivos realizando un disparo por segundo.

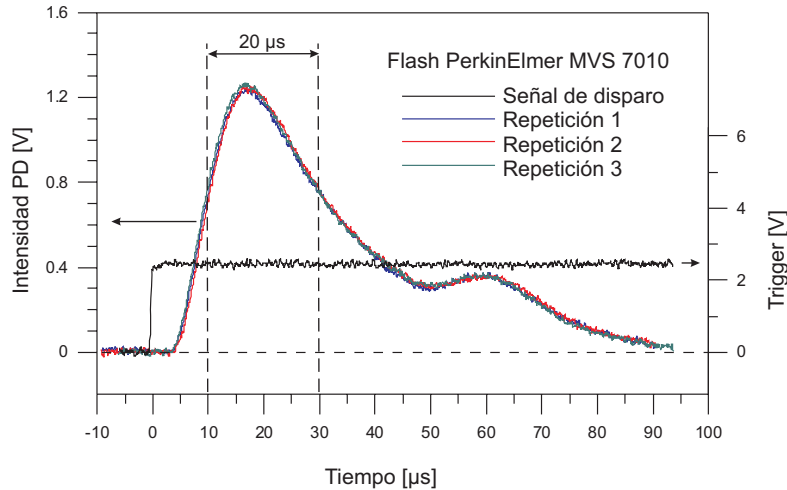


Figura 3.4: Curva de descarga de la lámpara estroboscópica antepuesta a la señal eléctrica de disparo.

En las diferentes medidas se corrigió el origen de tiempos posicionando la señal de disparo de flash ('trigger') en el tiempo 0. En todos los casos visualizados, se observó un retraso de unos $10 \mu\text{s}$ entre la señal de disparo y el momento en que la curva de descarga comienza a ser significativa en el tercio superior. En este tramo de intensidad máxima de descarga, como se observa en la figura 3.4, la curva permanece por encima de $0,8 \text{ V}$ (tercio superior) por un intervalo de tiempo aproximado de $20 \mu\text{s}$, confirmando la información del fabricante. Con estas características fue posible 'congelar' el rápido evento de inyección con un tiempo grande de obturación de la cámara para evitar la dispersión entre fotos.

Según la disposición de la radiación utilizada para iluminar un proceso, esta puede ser puntual, extensa, difusa, direccionales, etc.

- Una fuente de luz se considera puntual cuando el tamaño de la fuente es del orden de la longitud de onda. En la práctica, no existen fuentes de

luz perfectamente puntuales sino que tienen unas dimensiones, es decir lo que se maneja en los experimentos son fuentes de luz extensas.

- Las fuentes de luz extensa se pueden considerar como la suma de muchas fuentes puntuales unidas que se organiza en forma de círculos, rendijas, etc.
- La iluminación difusa se utiliza en aplicaciones donde se requiera una iluminación uniforme no direccional. Esta se consigue posicionando un difusor en el camino óptico de la iluminación.
- La direccionalidad de la radiación generada por las fuentes láser, facilita la generación de haces de luz colimados (rayos paralelos) o láminas, mediante el uso de la óptica adecuada.

3.3.3. Sistemas de sincronización

El objetivo de los sistemas de sincronización es generar de forma controlada señales lógicas tipo TTL con diferentes desfases respecto a una señal de referencia 'trigger'. Esta señal de referencia varía en función de la instalación donde se realice el estudio. No obstante, su posición relativa a la señal de inyección es conocida, facilitando la referencia temporal de sucesos. Las señales de salida son empleadas en el accionamiento de los dispositivos optoelectrónicos como cámaras, sistemas de iluminación, etc.

Para cumplir el objetivo de la generación de señales, se ha diseñado un sistema de sincronización basado en tarjetas de contadores (National Instrument PCI-6602). En todos los casos el desfase entre la señal de referencia o trigger de entrada y las señales de salida, con que se controla el disparo de los dispositivos, se fija por medio de software configurable. La programación del software de control se llevó a cabo en lenguaje 'LabVIEW' teniendo en cuenta los siguientes requisitos en la generación de las señales TTL:

- Se deben generar un número de señales independientes y suficientes en número para cumplir con todos y cada uno de los elementos y equipos de medida que deben ser referenciados.
- Se debe poder configurar tanto la polaridad como la duración del pulso para cada señal TTL de salida.
- En casos concretos, se deben generar un tren de pulsos configurable por cada señal de referencia o entrada.

En un ensayo típico de visualización con cámaras CCD, la secuencia de adquisición de imágenes se realiza registrando varias tomas para un mismo tiempo después del inicio de la inyección (ASOI). Posteriormente, se lleva a cabo el avance temporal de las señales de salida con lo cual se tendrán imágenes para diferentes instantes de tiempo ASOI, con varias repeticiones por instante.

3.4. Instalaciones experimentales

Durante años los diferentes grupos de investigación en motores han recurrido al diseño de diversas instalaciones experimentales que reproduzcan en mayor o menor medida las propiedades termodinámicas de un motor real. Estas instalaciones han venido evolucionando para cumplir con las expectativas de lograr imágenes de mejor calidad en condiciones cada vez más realistas. La evolución más reciente se presenta en el estudio de los actuales motores de inyección directa (DI) donde es importante la visualización de todos los chorros de una tobera durante un mismo evento de inyección y la evaluación de la dispersión entre ellos.

La presente sección presenta un breve resumen de la evolución de las instalaciones experimentales utilizadas para la visualización de la inyección y combustión. Posteriormente se presentan las características particulares de las instalaciones donde fueron adquiridas las imágenes del presente trabajo.

3.4.1. Maquetas de inyección y motores ópticos

Maquetas de inyección

Estas son instalaciones experimentales donde se reproducen parcialmente las condiciones termodinámicas de un motor en el momento de la inyección. En este gran campo es posible encontrar maquetas isotermas de alta densidad donde la cámara donde se inyecta el combustible se llena con un gas previamente comprimido. En las máquinas de compresión rápida, por el contrario, la compresión se logra gracias al trabajo realizado por un pistón sincronizado con el sistema de inyección [63]. La inyección suele realizarse en culatas de geometría modificada que permite la adaptación de amplios accesos ópticos. El gas utilizado para el llenado de las cámaras permite trabajar tanto en condiciones reactivas como inertes según sea aire atmosférico o un gas inerte.

Las maquetas de inyección de chorro libre (en ausencia de movimiento de aire) fueron desarrolladas para aislar ciertas propiedades termodinámicas del

motor y poder así estudiar el proceso de inyección de chorro líquido en condiciones controladas. Estas maquetas se caracterizan por permitir campos de visualización más amplios con un mayor número de accesos —importantes en determinadas aplicaciones— y porque se pueden controlar con mayor facilidad diferentes variables que afectan el proceso de combustión.

El desarrollo de estas instalaciones se ha presentado junto con los adelantos tecnológicos en equipos informáticos y optoelectrónicos que han facilitado la implementación de las metodologías de visualización. Shiozaki *et al.* [78], realizan una extensa revisión bibliográfica del desarrollo cronológico de diferentes tipos de instalaciones para el estudio del chorro en condiciones reactivas. Se observa en el trabajo como el uso de este tipo de instalaciones comienza a cobrar importancia en los primeros años de la década de los sesentas [62], en estudios experimentales de inyección en condiciones de alta presión y temperatura. No obstante, existen registros de imágenes de chorro Diesel desde 1925 donde la inyección se ha llevado a cabo en condiciones ambientales [79].

Motores ópticos

Entre los motores ópticos se encuentran los motores transparentes y motores con acceso por endoscopio. En los primero se suelen sustituir partes del motor por ventanas con geometrías similares a las de la pieza que sustituyen, como por ejemplo la cabeza del pistón y secciones del plano de culata o del cilindro. En el segundo caso, las modificaciones al motor son menores y se accede a la cámara de combustión por medio de fibras ópticas y endoscopios. A diferencia de las maquetas, en los motores ópticos, los accesos no solo deben soportar las altas cargas asociadas a las fluctuaciones periódicas de presión y temperaturas sino que también sufren un rápido deterioro de la transmitancia óptica por ensuciamiento debido a la deposición del combustible y de productos de la combustión como el hollín.

Desde el punto de vista de los accesos realizados en los motores ópticos de investigación, los diseños más simples consisten en la instalación de una ventana de cuarzo en el plano de culata, generalmente, en lugar de una de las válvulas de escape. Esta configuración suele limitar el campo de visión a la visualización de un solo chorro o parte de él. Payri *et al.* [80] y Pastor [5] presentan uno de los primeros diseños de acceso a través de la culata realizados en el departamento para medidas de LDA en motor.

Para mejorar el campo de visión (poder observar todo el chorro o todos los chorros), se diseñaron y adaptaron nuevos accesos a los motores (ver figura 3.5). Los nuevos diseños iban desde la implementación de ventanas laterales

en las paredes del cilindro, hasta el uso de pistones de cabeza transparente [81, 82]. Con esta última configuración fue posible la visualización de toda la cámara de combustión aunque se modifican el volumen donde se inyecta —se suele ubicar una ventana de cara plana en el lugar donde iría el ‘bowl’ tallado en la cabeza del pistón— y a la geometría del motor —el pistón se alarga como se muestra en la figura para poder acceder por medio de espejos, al interior y por lo tanto a la ventana—. Debido a las modificaciones estructurales, el régimen de giro máximo de este tipo de motores suele ser algo menor que el máximo del motor real (entre 2000 y 3000 rpm).

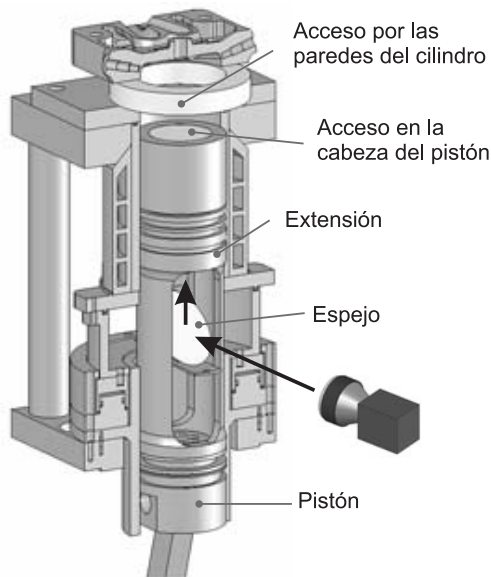


Figura 3.5: Modelos seccionado del bloque de un motor transparente tradicional con accesos por el cilindro y la cabeza del pistón.

Otro gran desarrollo fueron los motores con acceso por endoscopio [83–85]. La importancia de estas instalaciones radica en que no existen limitaciones de régimen ni modificaciones importantes en la geometría de la cámara de combustión. Solo se deben efectuar pequeñas perforaciones en la culata por donde se insertan los endoscopios y fibras ópticas para la visualización e iluminación. El principal inconveniente del uso de este tipo de instalaciones se encuentra en las distorsiones que sufren las imágenes por la forma de las ventanas que protegen los endoscopios, motivo por el cual se deben implementar complejos algoritmos de corrección de distorsiones al procesado de las imágenes.

En el presente trabajo de tesis se presentan diferentes imágenes de la visualización de los procesos de inyección, evaporación, autoencendido y combustión Diesel, adquiridas en diferentes instalaciones experimentales. En el siguiente apartado se exponen sus características particulares, centrandó la atención en aquellas que afectan las propiedades de las imágenes.

3.4.2. Maquetas isoterma de SF₆ y N₂

Estas dos instalaciones experimentales han sido utilizadas en la visualización de chorro libre isoterma: la instalación de SF₆ en la visualización del ondas de choque del capítulo 5 y la maqueta de N₂ en la visualización del proceso de inyección del capítulo 4.

Maqueta de SF₆

El antecedente más inmediato de la presente tesis, es el trabajo realizado por Palomares [18] quien presentó, entre otros temas, una metodología para el estudio de chorro líquido con la aplicación de la técnica de iluminación trasera difusa. Esta técnica requiere de dos accesos ópticos enfrentados de forma tal que la cámara pueda registrar la luz de una fuente externa que atraviesa un medio difusor. Del chorro se observa la sombra que este produce en un fondo uniformemente iluminado. Las imágenes para este estudio fueron adquiridas en una maqueta de chorro libre inyectando a temperatura ambiente y en ciclo cerrado de hexafluoruro de azufre (SF₆) [86, 87]. El peso molecular de este gas (146 g/mol) permite simular la densidad y viscosidad del aire existente en la cámara de combustión de un motor Diesel durante el proceso de inyección de combustible. La instalación cuenta con tres amplios accesos ópticos, con ventanas de polimetacrilato de metilo (transmitancia aproximada $T = 92\%$), dos de ellos enfrentados entre sí y el tercero perpendicular a los otros dos. Esta instalación se suele emplear en el estudio de chorros aislados.

Maqueta de N₂

Esta instalación es un robusto hexaedro de acero al cual se le han practicado varias perforaciones pasantes de 80 mm de diámetro mínimo en el centro de las caras [88–90]. Una de las perforaciones laterales esta destinada al soporte del inyector mientras las caras superior e inferior se destinaron a la admisión de N₂ y la evacuación de gas y combustible remanente. Para la visualización y la iluminación se adaptaron tres ventanas de polimetacrilato de metilo a las tres perforaciones restantes. Dos de ellas enfrentadas para la visualización con la técnica de iluminación trasera difusa o para la iluminación en la configuración de visualización de toberas de múltiples chorros (§ 4.2). En esta configuración, el acceso enfrentado al soporte del inyector es utilizado para la adquisición de las imágenes. En la figura 3.6 se aprecian la distribución de los accesos para la iluminación y la visualización. La ventaja de la maqueta de N₂ frente a la de SF₆ es que en la primera se inyecta en condiciones de presión más realista

por lo que es posible reproducir mejor las condiciones de cavitación en los inyectores.

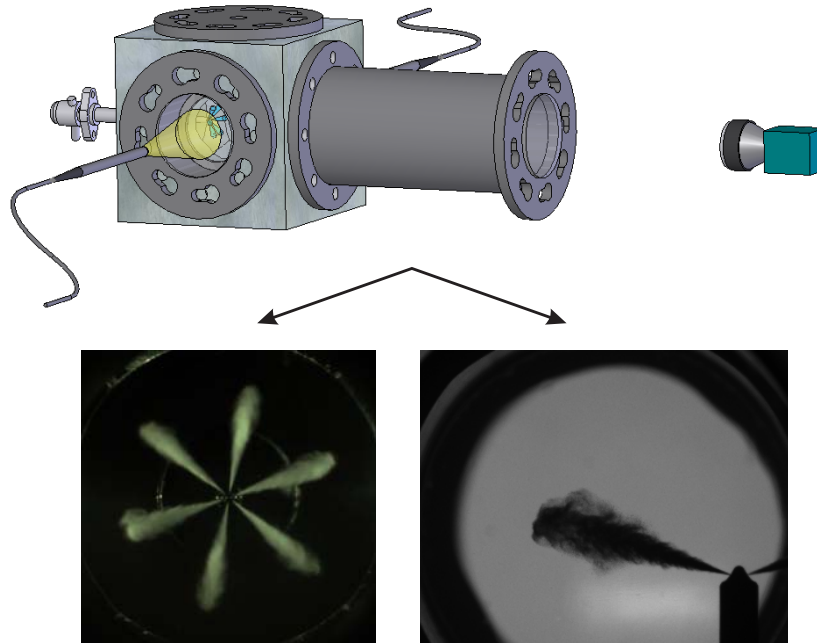


Figura 3.6: Modelo de la maqueta de N_2 con imágenes típicas de la visualización en la configuración de múltiples orificios y de iluminación trasera difusa. La disposición de los elementos ópticos es la utilizada en la visualización de múltiples chorros.

3.4.3. Motor-maqueta

La instalación del motor-maqueta fue diseñada para facilitar el estudio, mediante visualización, de los procesos de inyección-combustión Diesel en un entorno más cercano al del motor real, conservando parte de las características de accesibilidad óptica de las maquetas isoterma. En esta instalación, el chorro penetra en una atmósfera de alta densidad, presión y temperatura, en condiciones reactivas o inertes, según se inyecte en atmósfera de aire o de N_2 . La instalación está formada por un motor térmico mono-cilíndrico de dos tiempos de barrido de lazo y tres litros de cilindrada, el cual conserva su velocidad constante (entre 500 y 750 rpm) gracias a la acción de un motor asíncrono.

En este entorno el proceso de combustión resulta más sencillo de analizar que en el caso de motores rápidos de pequeña cilindrada:

- En primer lugar, el diseño de los conductos de admisión no suele producir un movimiento intenso de aire lateral al chorro para apoyar el proceso de mezcla entre el aire y el combustible, lo que hace que la evolución del chorro sea prácticamente rectilínea desde que sale de la tobera hasta el momento en que choca con la pared.
- En segundo lugar, las dimensiones de la cámara son suficientes para que el proceso de evaporación del combustible se realice de forma completa en la mayoría de los casos mucho antes del choque con la pared. Con ello, la secuencia de procesos físico-químicos de mezcla y reacción entre el combustible y el aire no queda interrumpida por la interacción con una superficie que suele estar más fría que la mezcla. Como resultado, la evolución es más ordenada que en el caso de los motores de pequeña cilindrada, y la estructura de la llama es más parecida a la que se puede observar en estudios de tipo más básico acerca de llamas turbulentas.

La visualización se lleva a cabo a través de amplios accesos ópticos ubicados en culatas modificadas con diseños varios en función de la posición del inyector y la posibilidad de chorros visualizados, el volumen de gas admitido y del número y geometría de los accesos y ventanas, generalmente de cuarzo —con excelentes características de transmisividad en el UV— o zafiro —caracterizado por su alta resistencia mecánica—. Las imágenes de la visualización de la inyección, evaporación y combustión, en la instalación del motor-maqueta y en las diferentes configuraciones de este trabajo, han sido adquiridas en dos diferentes configuraciones de culatas:

- Culata para la visualización de múltiples chorros: Esta culata ha sido diseñada para el estudio de sistemas de inyección de múltiples chorros con o sin *swirl*. Este se genera gracias a un dispositivo que controla la admisión de aire en la cámara de combustión⁵. La cámara de combustión tiene una geometría cilíndrica de 35 mm de longitud y diámetro variable de aproximadamente 46 mm (según la cámara de admisión de aire utilizada). Como se observa en la figura 3.7, solo cuenta con un acceso óptico opuesto al soporte del inyector por donde se debe realizar tanto la visualización como la iluminación, cuando se requiere.
- Culata para la visualización de toberas de orificio único: En esta variante, el volumen se encuentra determinado por un cilindro de diámetro de 45 mm y de 91 mm de altura. Como se observa en la figura 3.8, la culata

⁵En el presente trabajo, las imágenes han sido adquiridas evitando el efecto del *swirl*, salvo uno de los ejemplos del capítulo 6.

cuenta con cinco accesos al interior de la cámara de combustión: uno en la parte superior para la instalación del inyector y cuatro laterales para 3 ventanas elípticas de 81 mm de longitud y 30 mm de anchura efectiva, y para el transductor de presión. El aire se admite en la cámara de combustión por la parte inferior de la culata gracias a la compresión del pistón del motor mono-cilíndrico. Por el número de accesos se suelen visualizar dos fenómenos simultáneos: a través de los accesos enfrentados, el chorro bifásico o la radiación incandescente, y la radiación de emisión natural por el acceso perpendicular a los anteriores.

Para la inyección del combustible, la instalación dispone de un sistema independiente que permite adaptar casi cualquier sistema de inyección. Comúnmente, los sistemas más usados en el motor-maqueta han sido sistemas Common-Rail capaces de inyectar a altas presiones (desde 30 MPa hasta 180 MPa).

Los detalles de diseño y desarrollo de la instalación se pueden encontrar en el trabajo de Martínez [91]. En otros trabajos como Pastor *et al.* [92],

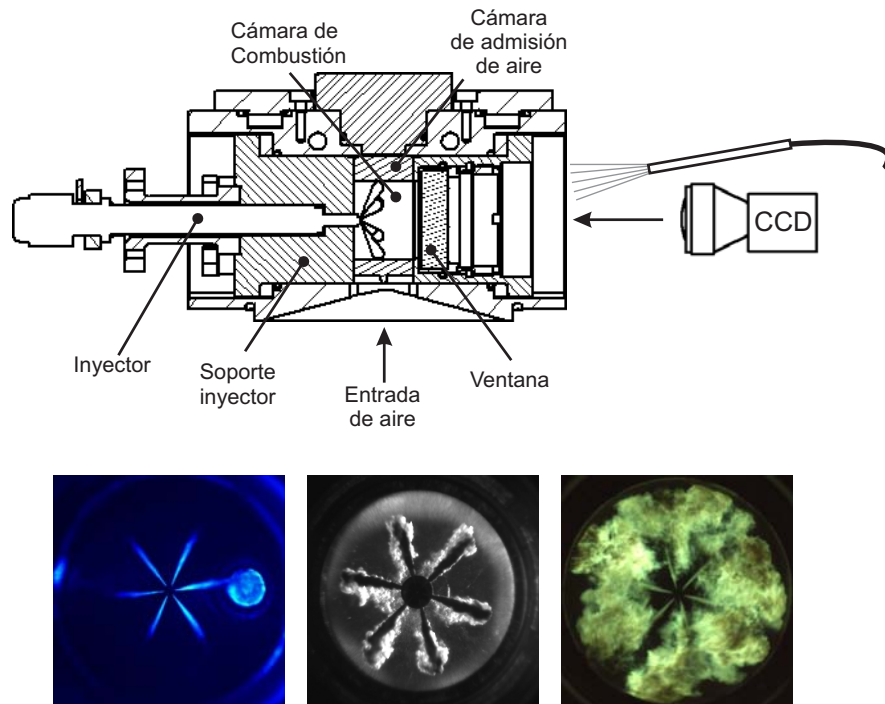


Figura 3.7: Esquema seccionado de la culata para la visualización de toberas de múltiples orificios con imágenes de la inyección, evaporación y combustión Diesel. La iluminación y la visualización se llevan a cabo a través de un único acceso.

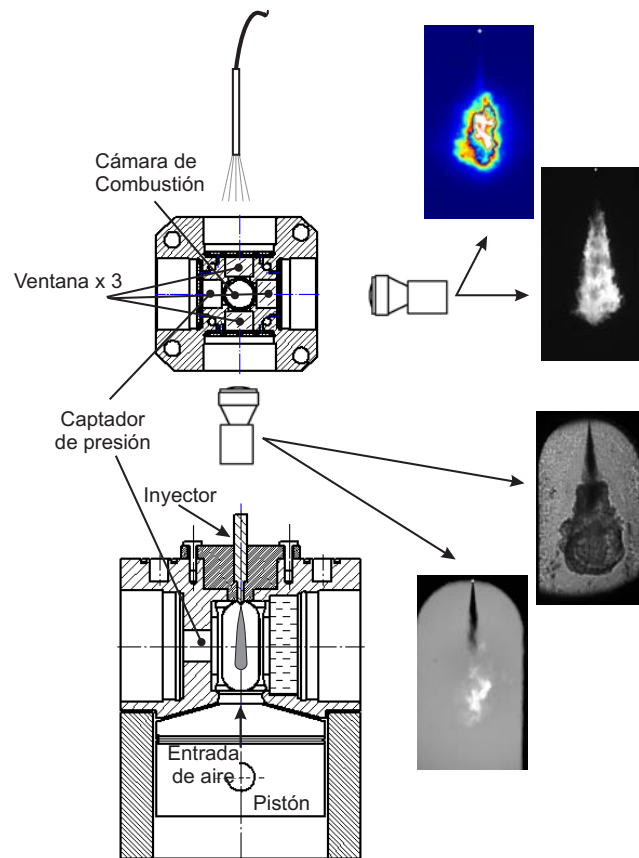


Figura 3.8: Esquema seccionado (vista lateral y superior) de la culata para la visualización de toberas de orificio único con ejemplos de imágenes de quimioluminiscencia e incandescencia y de shadowgraphy e iluminación trasera difusa.

Desantes *et al.* [93] y Payri *et al.* [26] se presentan algunos estudios aplicando diferentes técnicas ópticas al análisis de chorro Diesel en la instalación del motor-maqueta, todas ellas en la configuración de visualización de toberas mono-orificio.

3.4.4. Motor óptico transparente

La instalación del motor óptico transparente está constituida por un motor térmico mono-cilíndrico modificado y adaptado para la visualización. El diseño original es el de un motor Diesel DI comercial de 550 cm³ de cilindrada unitaria, de cuatro tiempos, cuatro válvulas por cilindro y cuatro cilindros.

Las principales modificaciones realizadas, que marcan la diferencia entre la instalación óptica y el motor real, son la implementación del amplio instrumental de medida y control, así como las modificaciones estructurales para facilitar la visualización similares a las de la figura 3.5.

Al igual que en la maqueta reactiva o motor maqueta, en el motor óptico transparente el efecto de ensuciamiento de la ventana se minimiza controlando la frecuencia de los eventos de inyección (se inyecta una vez cada cierto número de ciclos de motor), lo que significa que el motor no desarrolla un trabajo de combustión suficiente para su autonomía. El régimen de giro del motor se conserva constante por la acción de un motor asíncrono, actuando como dinamofreno. El régimen de giro máximo nominal de la instalación es de 2000 rpm.

El volumen de la cámara de combustión se puede modificar mediante alteraciones en las dimensiones del bloque del motor. Estas modificaciones se pueden realizar mediante la adaptación de secciones de cilindro para aumentar la profundidad de la cámara de combustión. Pastor *et al.* [94] describen en detalle la instalación y las modificaciones realizadas para las condiciones peculiares de estudios de arranque en frío mediante visualización.

3.5. Análisis de imágenes del chorro Diesel

El uso de sistemas de visión artificial en aplicaciones científicas, tienen como objetivo analizar mediante imágenes un determinado evento y comunicar los resultados al investigador. Los resultados se obtienen gracias a la interpretación que los sistemas automáticos de procesamiento digital de imágenes (PDI) hacen de la escena visualizada, mejorando así la percepción del medio de estudio. Un factor de gran importancia en el diseño de los sistemas de visión artificial y PDI, es el estado actual de desarrollo tecnológico que permite adquirir sistemas informáticos de gran capacidad y velocidad de procesamiento, junto con sistemas ópticos de gran precisión y fiabilidad.

3.5.1. Procesado digital de imágenes

Los sistemas de procesamiento digital de imágenes están constituidos por diversos algoritmos cuya finalidad son:

- La preparación de las imágenes para su posterior análisis (pre-procesado).

- La detección, segmentación, localización y reconocimiento del objeto de estudio.
- El análisis y filtrado de los resultado de la segmentación y el registro de los atributos medidos (post-procesado).

El alcance de los algoritmos de PDI se puede ampliar mediante el análisis temporal del objeto de estudio en una secuencia de imágenes, para lo cual se integran apropiadamente optimizando el tiempo de procesado.

Los criterios de desarrollo de los algoritmos de PDI, son diversos según los objetivos particulares de cada aplicación. En la literatura es posible encontrar un gran número de ellos desarrollados para diversas aplicaciones, tanto científicas como industriales. Los trabajos de González y Woods [95] y de Russ [96] resumen una buena parte de ellos. Como ejemplo, Lapuerta *et al.* [97] proponen un método alternativo a las técnicas de medida en línea para la estimación de la distribución de tamaños de partículas producto de la combustión Diesel, basado en el procesado automático de imágenes obtenidas por microscopía de las partículas filtradas.

En la visualización de la inyección y combustión Diesel, la importancia del procesado automático de las imágenes se encuentra en el gran número de fotogramas obtenidos en un estudio y que deben ser analizados. Se calculan los atributos de cada imagen individual ya que sus características varían dependiendo de múltiples factores como el estado de desarrollo del chorro, las condiciones de la atmósfera donde se inyecta, el tipo de iluminación utilizada, etc.

Preparación de las imágenes

Una de las tareas de los algoritmos de preparación o pre-procesado, es la interpretación de los ficheros generados por los sistemas de adquisición (imágenes en formato ‘raw’) como matrices de enteros con la información de cada píxel en la imagen (ver § 4.3.1). La información de las matrices podrá ser modificada para ofrecer imágenes más adecuadas para su posterior segmentación y análisis mediante el suavizado en el dominio espacial o frecuencial, tratamientos aritméticos —suma, resta, división de imágenes—, extracción de las propiedades de la imagen —cálculo de histogramas (representación gráfica de los niveles digitales en el rango dinámico de la imagen) y reconstrucción del color—, etc. Desde un punto de vista general, las tareas principales de estas funciones son:

- Mejora y restauración.
- Eliminación de ruido.
- Corrección de distorsiones ópticas.
- Corrección de fluctuaciones de luz.
- Preparación de las imágenes para la segmentación.

En la elección de un determinado algoritmo de pre-procesado se deben tener presentes las irreversibilidades que caracterizan a la mayoría de estas funciones. Palomares [18] presenta un resumen de los algoritmos desarrollados por diversos autores para la preparación de sus imágenes en el campo de los MCI. En el presente trabajo el uso de estos algoritmos se ha evitado, ya que, como se verá en el desarrollo del documento, su inapropiada implementación puede conducir a la eliminación de información importante para el registro de las medidas y el análisis de resultados.

Segmentación

Los algoritmos de segmentación dividen la imagen de una escena en un conjunto de regiones de características similares de intensidad, color o textura. Estos se basan en la identificación de las características comunes de los objetos y la determinación de las discontinuidades que definen los límites entre ellos. Es uno de los elementos más importantes en cualquier sistema de PDI ya que es el primer paso al entendimiento de la imagen y de los objetos presentes en ella. En ocasiones los algoritmos fallan cuando la información de una escena no se registra siguiendo los criterios con que son diseñados.

En la literatura especializada en análisis de imágenes es posible encontrar un gran número de algoritmos para la segmentación de imágenes [98, 99], tanto en color como escala de grises, con diferentes características de robustez, coste, precisión, etc. Todas ellas para aplicaciones varias como la medicina, sistemas de control, visión artificial en tiempo real, etc. Entre los diferentes autores no se encuentra un criterio claro de clasificación entre estos algoritmos debido a que muchos integran soluciones conjuntas, no obstante, una posible clasificación podría ser la siguiente:

- Algoritmos de detección del gradiente: El objetivo de estos algoritmos es la detección de discontinuidades bruscas de intensidad en las imágenes. Para su aplicación, se definen máscaras o filtros que barren la imagen

píxel a píxel, evaluando su relación con los píxeles vecinos. El éxito de la segmentación está determinado por el tamaño y forma de la máscara, la geometría de los objetos y el nivel de ruido.

- Algoritmos de detección de bordes: El modo de funcionamiento de estos algoritmos es similar al anterior, no obstante su objetivo es el de definir una frontera clara entre los objetos (*'contorno'*) y no sólo discontinuidades de intensidad en la imagen. Para ello se evalúa la imagen y se definen patrones de intensidad característicos del nivel digital esperado para el contorno. Esto implica un análisis estadístico de la imagen, con lo cual se disminuirá el efecto del ruido en el resultado final.
- Algoritmos de umbralización: Esta es una metodología que consiste en la definición de un nivel digital umbral al que pertenecen los píxeles de las fronteras de separación entre objetos (en función del número de objetos n , existirán $n-1$ niveles de umbral). Los métodos se fundamentan en la obtención del histograma de la imagen y su caracterización morfológica. Suelen ser algoritmos de bajo coste computacional [100].
- Algoritmos de segmentación por texturas: La principal dificultad de los métodos de detección de bordes, es la definición de un criterio claro de selección del patrón esperado de un determinado objeto. Por otro lado en la umbralización, si los objetos se encuentran en los mismos rangos de nivel digital, la dificultad para caracterizar cada una de las distribuciones de los objetos en el histograma se hace evidente. Para resolver este inconveniente, se han desarrollado algoritmos que buscan identificar patrones de texturas independientemente del comportamiento de la luminosidad y frecuencia. Se evalúa así la forma y la orientación de las texturas de los objetos en la imagen [96]. Estos algoritmos se caracterizan por tener un coste computacional alto.

Los algoritmos de segmentación de chorro líquido y chorro evaporado propuestos en este trabajo, se basan en la umbralización mediante la definición de patrones característicos de la morfología de los histogramas de las imágenes. En el proceso de clasificación, aplicando la teoría de *reconocimiento de patrones*, los objetos o *'clases'*⁶ son ordenados por vectores característicos para luego tomar decisiones sobre ellos [101, 102]. Las imágenes de la radiación natural de la combustión, se caracterizan mediante el análisis estadístico de las distribuciones de intensidad.

⁶En adelante se utilizarán ambas definiciones para referenciar los objetos o clases, chorro y fondo, presentes en las imágenes de los estudios de inyección-combustión Diesel.

Post-procesado

El objetivo del post-procesado consiste en interpretar los resultados de la segmentación y presentarlos de una forma cómoda y fácil de analizar.

El resultado de la segmentación es una nueva imagen, generalmente binaria, donde los píxeles correspondientes a cada clase aparecen agrupados en una ó varias regiones. Sobre esta imagen se pueden realizar transformaciones como: filtrado y eliminación de ruido, rotaciones, cálculos de contorno, cambios de escala, corrección de distorsiones ópticas.

Si el objetivo del procesado es la caracterización geométrica de los objetos o clases, los algoritmos de post-procesado medirán sobre los contornos obtenidos. Los resultados de la medición son entonces recopiladas en hojas de cálculo, facilitando el registro de toda la información integrada en un mismo fichero de resultados sobre el que se pueda realizar un análisis estadístico temporal y posteriormente graficar.

Otros algoritmos del post-procesado tienen como función mejorar el contraste de las imágenes haciéndolas más cómodas para un observador humano. El pseudocoloreado o falso color, por ejemplo, aumenta el rango dinámico de una imagen para que un observador pueda distinguir detalles que de otra forma no detectaría.

3.5.2. Algoritmos de segmentación de chorro Diesel

Es poca la información que se puede encontrar en la literatura en cuanto a los algoritmos de segmentación utilizados para el análisis de imágenes de chorros Diesel. El motivo es que los diferentes autores suelen presentar los resultados finales fruto del procesado, no obstante, es poca o nada la descripción de la metodología y los criterios de selección de los parámetros característicos de estas técnicas. Palomares [18] pone de manifiesto este problema y lo expone en su trabajo mediante el estudio del estado del arte de las metodologías de PDI en los estudios de inyección-combustión en MCIA. Esta tendencia a escribir poco sobre los algoritmos de PDI ha disminuido sutilmente en los últimos años como se presenta en el trabajo publicado por el autor de la presente tesis doctoral [103].

Utilizando métodos de umbralización, muchos autores suelen definir como umbral un nivel digital fijo para todos los fotogramas de una misma secuencia [9, 25]. Este umbral lo determina un operario mediante un estudio subjetivo de las características de las imágenes. El método de selección suele ser más o

menos robusto, sin embargo no es apto cuando las características cambian, debido a fluctuaciones de luz o cuando el contraste entre objetos es pobre. Como ejemplo en estudios de chorro líquido, no siempre es posible determinar, a simple vista, los límites del chorro, lo que si suele pasar cuando se visualiza una llama intensa sobre un fondo negro.

Buscando un algoritmo más robusto, que permita procesar un mayor número de imágenes con algún índice de variabilidad, algunos autores han implementado otros algoritmos de procesamiento automático. Shao *et al.* [104] y Klein-Douwel *et al.* [105] proponen un algoritmo basado en el método del gradiente analizando cada imagen en el dominio espacial. Bysveen *et al.* [106] realizan un estudio temporal del evento realizando diferentes exposiciones de una misma escena y determinando el valor esperado para cada píxel en la imagen; es decir, se determina el umbral de una imagen media para la segmentación de las imágenes individuales.

En opinión del autor, los algoritmos más robustos para la segmentación de imágenes de inyección-combustión Diesel, son los que se basan en métodos de umbralización. Cronhjort y Wåhlin [107] realizaron un estudio de los histogramas de imágenes de chorros encontrando un patrón común, que es la forma acusada y aguda de la distribución de la luminosidad por el fondo. El cálculo automático del umbral del corte se consiguió mediante el análisis de la primera derivada del histograma, previa aplicación de cálculos aritméticos entre imágenes, de lo cual hay poco detalle.

Haciendo uso de las herramientas de reconocimiento de patrones, Seneschal *et al.* [108] presentan un algoritmo conocido como ‘Entropic thresholding’, basado en el cálculo de la entropía de las distribuciones de clases. El umbral de corte se obtiene mediante un proceso iterativo que evalúa diferentes niveles digitales y define como umbral óptimo el nivel digital en el cual la suma de las entropías de clases es máxima. Este proceso requiere un conocimiento a priori del rango de niveles digitales a evaluar, lo cual no se menciona en el trabajo publicado.

En la tesis de Palomares [18], claro antecedente y punto de partida de ésta, se presenta un buen ejemplo del uso de herramientas de reconocimiento de patrones en el diseño de algoritmos de segmentación de imágenes de chorro Diesel. En la publicación de los resultados en [109] se presenta un algoritmo diseñado para la segmentación de imágenes adquiridas con una cámara de color provista con un sistema de filtros CFA (ver § 3.3.1), cuya principal característica era la forma rectangular de los sensores, mayor número de filtros de color verde del CFA (75% mayor que para los otros colores) y un rango dinámico de 256 niveles digitales para cada color. El algoritmo, conocido como

3D LRT, usaba la información del color en el espacio RGB para el cálculo del umbral.

El algoritmo fue simplificado en [110] disminuyendo el coste de procesado. El trabajo consistió en la definición de un vector característico del espacio RGB, conocido como ‘dirección privilegiada’. Como alternativa, se eligió una de las matrices del color (verde) y se aplicó el algoritmo solo a esta matriz. En todos los casos, se consideró que la distribución de la luminosidad por las clases tenía forma gaussiana.

Nuevas configuraciones, junto con nuevos sistemas de adquisición, tanto monocromáticos como de color, más sensibles y con mayor rango dinámico, han dejado, en ocasiones, obsoleta la premisa de normalidad. Recientemente se ha publicado un nuevo trabajo en el cual se plantean nuevas funciones de distribución que caracterizan los histogramas de estas nuevas imágenes [103]. Esta publicación, hace parte del trabajo de investigación presentado en la tesis doctoral, por lo que se darán mayores detalles en el capítulo 4, y detalles de la extensión de la metodología para imágenes de Schlieren y shadowgraphy del capítulo 5.

3.6. Resumen

En este capítulo se ha hecho una revisión de las técnicas de visualización más habituales en MCIA, los principales componentes de los sistemas de visualización y sus características, las instalaciones en las que realizar los estudios experimentales de chorro y combustión y los principales métodos de procesado de imágenes.

En particular, las diferentes técnicas de las cuales se ha hablado se resumen en la tabla 3.2. La implementación de estas técnicas permite obtener parámetros característicos de las diferentes fases del proceso y los fenómenos físico-químicos involucrados en su desarrollo. La implementación de las metodologías de visualización, está limitada a las características de las instalaciones (disponibilidad de accesos para visualización e iluminación, si es requerido) y del fenómeno que se pretende visualizar.

Tabla 3.2: Tabla resumen de las técnicas de visualización utilizadas en MCIA.

Fenómeno visualizado	Técnica de visualización	Parámetros característicos	Entorno donde se visualiza
Atomización	Iluminación con lámina láser	Geometría del chorro líquido. Imagen tomográfica.	Maquetas de inyección y motor transparente. Min. dos accesos perpendiculares.
	Dispersión de luz blanca	Geometría del chorro líquido, penetración, ángulo, volumen.	Maquetas y motores.
	Iluminación trasera difusa	Geometría del chorro líquido, penetración, ángulo, volumen.	Maquetas de inyección. Dos accesos enfrentados
	Extinción de luz	Campos de concentraciones de gotas.	Maquetas de inyección. Dos accesos enfrentados
	PIV	Campos de velocidades de gotas.	Maquetas de inyección y motor transparente. Min. dos accesos perpendiculares.
	LIF	Geometría y campos de concentraciones de gotas.	Maquetas de inyección y motor transparente. Min. dos accesos perpendiculares.
Evaporación	Schlieren y Shadowgraph	Geometría del chorro evaporado	Maquetas de inyección y motor transparente. Con un acceso se requiere espejo.
	LIEF	Campo de concentraciones líquido y vapor.	Maquetas de inyección y motor transparente. Min. dos accesos perpendiculares
	Rayleigh	Localización de la fase vapor	Maquetas de inyección y motor transparente. Min. dos accesos perpendiculares.
Combustión	Quimio. CH	Tiempo de retraso, localización de autoencendido y combustión premezclada	Maquetas y motores.

Combustión	Quimio. OH	Geometría del frente de llama. Medidas de Lift-off	Maquetas y motores.
	Radiación térmica del hollín	Localización del hollín incandescente	Maquetas y motores.
	2 colores	Temperatura de llama y concentración de hollín	Maquetas y motores
	LII	Concentración de hollín	Maquetas de inyección y motor transparente. Min. dos accesos perpendiculares
	LIF OH	Localización del frente de llama	Maquetas de inyección y motor transparente. Min. dos accesos perpendiculares.
	LIF NO _x	Concentraciones de NO _x	Maquetas de inyección y motor transparente. Min. dos accesos perpendiculares

Bibliografía

- [1] Born M. y Wolf E. *Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Cambridge University Press, ISBN 0-521-64222-1, 1999.
- [2] Dec J.E. y Espey C. “Ignition and early soot formation in a DI diesel engine using multiple 2-D imaging diagnostics”. *SAE paper 950456*, 1995.
- [3] Pastor J.V., López J.J., Juliá J.E. y Benajes J.V. “Planar laser-induced fluorescence fuel concentration measurements in isothermal diesel sprays”. *Optics Express*, Vol. 10, pp. 309–323, 2002.
- [4] Juliá J.E. *Medida de concentraciones de combustible en chorros diesel mediante técnicas de fluorescencia inducida por láser*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003.
- [5] Pastor J.V. *Estudio experimental del movimiento del aire en un motor diesel de inyección directa mediante anemometría laser doppler*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1996.
- [6] van de Hulst H.C. *Light scattering by small particles*. Dover Publications, Inc., ISBN 0-486-64228-3, 1957.
- [7] Black D.L., McQuay M.Q. y Bonin M.P. “Laser-based techniques for particle-size measurement: A review of sizing methods and their industrial applications”. *Progress in energy and combustion science*, Vol. 22, pp. 267–306, 1996.
- [8] Zhao H. y Ladommatos N. *Engine combustion instrumentation and diagnostics*. Society of Automotive Engineers, ISBN 0-7680-0665-1, 2001.
- [9] Siebers D.L. “Liquid-phase fuel penetration in diesel sprays”. *SAE paper 980809*, 1998.
- [10] Lee S., Kusaka J. y Daisho Y. “Spray characteristics of alternative fuels in constant volume chamber (comparison of the spray characteristics of LPG, DME and *n*-dodecane)”. *JSAE Review*, Vol. 22, pp. 271–276, 2001.
- [11] Bruneaux G., Verhoevent D. y Baritaud T. “High pressure diesel spray and combustion visualization in a transparent model diesel engine”. *SAE paper 1999-01-3648*, 1999.

-
- [12] Espey C. y Dec J.E. “The effect of TDC temperature and density on the liquid-phase fuel penetration in a D. I. Diesel engine”. *SAE paper 952456*, 1995.
- [13] Arrègle J., Pastor J.V. y Ruiz S. “The influence of injection parameters on diesel spray characteristics”. *SAE paper 1999-01-0200*, 1999.
- [14] Heywood J.B. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill, Inc. ISBN 0-07-028637-X, 1988.
- [15] Ahmadi-Befrui B., Wiesler B. y Winklhofer E. “The propagation of fuel sprays in a research diesel engine – A join numerical and experimental analysis”. *SAE paper 910181*, 1991.
- [16] Tinaut F.V., Melgar A., Castro F., Sánchez M.L. y Giménez B. “A method to determine liquid concentration in non-stationary axisymmetric sprays”. *Experiments in Fluids*, Vol. 23, pp. 299–305, 1997.
- [17] El-Beshbeeshy M.S., Hodges J.T. y Corradini M.L. “Image analysis of diesel sprays”. *SAE paper 921628*, 1992.
- [18] Palomares A. *Análisis de imágenes de chorros diesel*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2001.
- [19] Melling A. “Tracer particles and seeding for particle image velocimetry”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 8, pp. 1406–1416, 1997.
- [20] Prasad A.K. “Particle image velocimetry”. *Current Science*, Vol. 79, pp. 51–60, 2000.
- [21] Ikeda Y., Yamada N. y Nakajima T. “Multi-intensity-layer particle-image velocimetry for spray measurement”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 11, pp. 617–626, 2000.
- [22] Dibble R.W. y Hollenbach R.E. “Laser Rayleigh thermometry in turbulent flames”. *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 18, pp. 1489–1499, 1981.
- [23] Espey C., Dec J.E., Litzinger T.A. y Santavicca D.A. “Planar laser Rayleigh scattering for quantitative vapor-fuel imaging in a Diesel Jet”. *Combustion and flame*, Vol. 109, pp. 65–86, 1997.
- [24] Schulz C., Gronki J. y Andersson S. “Multi-species laser-based imaging measurements in a Diesel spray”. *SAE paper 2004-01-1917*, 2004.

-
- [25] Maunoury B., Duverger T. y Mokaddem K. “Phenomenological analysis of injection, auto-ignition and combustion in a small D. I. Diesel engine”. *SAE paper 2002-01-1161*, 2002.
- [26] Payri F., Pastor J.V., Pastor J.M. y Juliá J.E. “Diesel spray analysis by means of planar laser-induced exciplex fluorescence”. *International Journal of Engine Research*, Vol. 7, pp. 77–89, 2006.
- [27] Senda J., Kobayashi M., Tanabe Y. y Fujimoto H. “Visualization and quantitative analysis of the fuel vapor concentration in diesel spray”. *JSAE Review*, Vol. 15, pp. 149–156, 1994.
- [28] Yeh C., Kamimoto T., Kosaka H. y Kobori S. “Quantitative measurement of 2-D fuel vapor concentration in a transparent spray via laser-induced fluorescence technique”. *SAE paper 941953*, 1994.
- [29] Settles G.S. *Schlieren and shadowgraph techniques: Visualizing phenomena in transparent media*. Springer–Verlag, ISBN 3-540-66155-7, 2001.
- [30] Kunkulagunta K.R. “Video imaging and analysis of common rail sprays in an optical engine using shadowgraphy technique”. *SAE paper 2000-01-1255*, 2000.
- [31] Tani Y., Saito A. y Yamada M. “Visualization of the evaporating process of the fuel spray in the cylinder of a diesel engine”. *JSME International Journal, Series II*, Vol. 32, pp. 673–678, 1989.
- [32] Shiozaki T., Suzuki T. y Shimoda M. “Observation of combustion process in D. I. diesel engine via high speed direct and schlieren photography”. *SAE paper 800025*, 1980.
- [33] Yamaguchi I., Nakahira T., Komori M. y Kabayashi S. “An image analysis of high speed combustion photographs for D. I. diesel engine with high pressure fuel injection”. *SAE paper 901577*, 1990.
- [34] Alessandretti G.C. y Violino P. “Flame propagation monitoring in an engine by optical technique”. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 4, pp. 177–185, 1983.
- [35] Dec J.E. y Espey C. “Chemiluminescence imaging of autoignition in a DI diesel engine”. *SAE paper 982685*, 1998.
- [36] Shoji H., Saima A. y Shiino K. “Simultaneous measurement of light emission and absorption behavior of unburned gas during knocking operation”. *SAE paper 932754*, 1993.

-
- [37] Musculus M.P.B. “Multiple simultaneous optical diagnostic imaging of early-injection low-temperature combustion in a heavy-duty diesel engine”. *SAE paper 2006-01-0079*, 2006.
- [38] Dec J.E. “A conceptual model of DI diesel combustion based on laser-sheet imaging”. *SAE paper 970873*, 1997.
- [39] Higgins B. y Siebers D. “Measurement of the flame lift-off location on DI diesel sprays using OH chemiluminescence”. *SAE paper 2001-01-0918*, 2001.
- [40] Higgins B., Siebers D. y Aradi A. “Diesel-spray ignition and premixed-burn behavior”. *SAE paper 2000-01-0940*, 2000.
- [41] Tinaut F.V., Melgar A., Reyes M., Pérez J.F. y Horrillo A. “Caracterización del proceso de combustión del gas pobre obtenido tras la gasificación de biomasa lignocelulósica para su uso en motores de combustión interna alternativos”. *8º Congreso iberoamericano de ingeniería mecánica (CIBIM8)*, 2007.
- [42] Fettes C., Göttler A. y Leipertz A. “Simultaneous visualization of spray and flame propagation in a heavy-duty transparent-engine with common-rail injection system”. *SAE paper 2000-01-1797*, 2000.
- [43] Dec J.E. “Soot distribution in a D.I. Diesel engine using 2-D Imaging of laser-induced incandescence, elastic scattering and flame luminosity”. *SAE paper 920115*, 1992.
- [44] Zhao H. y Ladommatos N. “Optical diagnostics for soot and temperature measurement in diesel engines”. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 24, pp. 221–255, 1998.
- [45] Payri F., Pastor J.V., García J.M. y Pastor J.M. “Contribution to the application of two-colour imaging to Diesel combustion”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 18, pp. 2579–2598, 2007.
- [46] Bakenhus M. y Reitz R.D. “Two-color combustion visualization of single and split injections in a single-cylinder heavy-duty D.I. Diesel engine using an endoscope-based imaging system”. *SAE paper 1999-01-1112*, 1999.
- [47] Hampson G.J. y Reitz R.D. “Two-color imaging of in-cylinder soot concentration and temperature in a heavy-duty DI diesel engine with comparison to multidimensional modeling for single and split injections”. *SAE paper 980524*, 1998.

- [48] Svensson K.I., Mackrory A.J., Richards M.J. y Tree D.R. “Calibration of an RGB, CCD camera and interpretation of its two-color images for KL and temperature”. *SAE paper 2005-01-0648*, 2005.
- [49] Ni T., Pinson J.A., Gupta S. y Santoro R.J. “Two-dimensional imaging of soot volume fraction by the use of laser-induced incandescence”. *Applied Optics*, Vol. 34, pp. 7083–7091, 1995.
- [50] Pastor J.V., García J.M., Pastor J.M. y Buitrago J.E. “Analysis of calibration techniques for laser-induced incandescence measurements in flames”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, pp. 3279–3288, 2006.
- [51] Schraml S., Will S., Leipertz A., Zens T. y D’Alfonso N. “Performance characteristics of TIRE-LII soot diagnostics in exhaust gases of diesel engines”. *SAE paper 2000-01-2002*, 2000.
- [52] Vander-Wal R.L. “Laser-induced incandescence: detection issues”. *Applied Optics*, Vol. 35, pp. 6548–6559, 1996.
- [53] Kock B.F., Tribalet B., Schulz C. y Roth P. “Two-color time-resolved LII applied to soot particle sizing in the cylinder of a Diesel engine”. *Combustion and Flame*, Vol. 147, pp. 79–92, 2006.
- [54] Michelsen H.A., Liu F., Kock B.F., Bladh H., Boiarciuc A., Charwath M., Dreier T., Hadeff R., Hofmann M., Reimann J., Will S., Bengtsson P.E., Bockhorn H., Foucher F., Geigle K.P., Mounaïm-Rousselle C., Schulz C., Stirn R., Tribalet B. y Suntz S. “Modeling laser-induced incandescence of soot: a summary and comparison of LII models”. *Applied Physics B*, Vol. 87, pp. 503–521, 2007.
- [55] Daily J.W. “Laser induced fluorescence spectroscopy in flames”. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 23, pp. 133–199, 1997.
- [56] Dec J.E. y Cnaan R.E. “PLIF imaging of NO formation in a DI diesel engine”. *SAE paper 980147*, 1998.
- [57] Brugman M., Stoffels G.G.M., Dam N., Meerts W.L. y ter Meulen J.J. “Imaging and post-processing of laser-induced fluorescence from NO in a diesel Engine”. *Applied Physics B*, Vol. 64, pp. 717–724, 1997.
- [58] Verbiezen K., Donkerbroek A.J., van Vliet A.P., Meerts W.L., Klein-Douwel R.J.H., Dam N.J. y ter Meulen J.J. “Laser beam attenuation in LIF measurements on NO in a diesel engine”. *Proceedings of the European Combustion Meeting*, 2003.

- [59] Dec J.E. y Coy E.B. "OH radical imaging in a DI diesel engine and the structure of the early diffusion flame". *SAE paper 960831*, 1996.
- [60] Kohse-Höinghaus K. "Laser techniques for the quantitative detection of reactive intermediates in combustion systems". *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 20, pp. 203–279, 1994.
- [61] Alcock J.F. y Scott W.M. "Some more light on Diesel Combustion". *Proceedings, Institution of Mechanical Engineers, Automobile Division*, Vol. 5, pp. 179–191, 1962-1963.
- [62] Scott W.M. "Understanding Diesel Combustion Through the Use of High-Speed Moving Pictures in Color". *SAE paper 690002*, 1969.
- [63] Rife J. y Heywood J.B. "Photographic and performance studies of diesel combustion with a rapid compression machine". *SAE paper 740948*, 1974.
- [64] Pickett L.M. y Siebers D.L. "Soot in diesel fuel jets: effects of ambient temperature, ambient density, and injection pressure". *Combustion and Flame*, Vol. 138, pp. 114–135, 2004.
- [65] Winklhofer E., Fuchs H. y Philipp H. "Diesel spray combustion – An optical imaging analysis". *SAE paper 930862*, 1993.
- [66] Boyle W.S. y Smith G.E. "Charge coupled semiconductor devices". *Bell System Technical Journal*, Vol. 49, pp. 587–593, 1970.
- [67] Mullikin J.C., Vliet L.J., Netten H., Boddeke F.R., van der Feltz G. y Young I.T. "Methods for CCD camera characterization". *Proceeding of SPIE*, Vol. 2173, pp. 73–84, 1994.
- [68] Hijazi A. y Madhavan V. "A novel ultra-high speed camera for digital image processing applications". *Measurement Science and Technology*, Vol. 19, 2008.
- [69] Hillebrand M., Stevanovic N., Hosticka B.J., Santos-Conde J.E., Teuner A. y Schwarz M. "High speed camera system using a CMOS image sensor". *Proceeding of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 656–661, 2000.
- [70] Fossum E.R. "CMOS image sensors: Electronic Camera-On-A-Chip". *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 44, pp. 1689–1698, 1997.

- [71] Carlson B.S. “Comparison of modern CCD and CMOS image sensor technologies and systems for low resolution imaging”. *Proceeding of IEEE*, Vol. 1, pp. 171–176, 2002.
- [72] Bigas M., Cabruja E., Forest J. y Salvi J. “Review of CMOS image sensors”. *Microelectronics Journal*, Vol. 37, pp. 433–451, 2006.
- [73] LaVision. *DynaMight Camera System, operation manual*. LaVision, 1998.
- [74] Sharma G. y Trussell J.T. “Digital color imaging”. *IEEE Transactions on Image processing*, Vol. 6, pp. 901–932, 1997.
- [75] Lukin A. y Kubasov D. “High-Quality algorithm for bayer pattern interpolation”. *Programming and Computer Software*, Vol. 30, pp. 347–358, 2004.
- [76] Lukac R., Plataniotis K.N. y Hatzinakos D. “Color image zooming on the bayer pattern”. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 15, pp. 1475–1492, 2005.
- [77] Gupta S., Poola R. y Sekar R. “Effect of injection parameters on diesel spray characteristics”. *SAE paper 2000-01-1600*, 2000.
- [78] Shiozaki T., Nakajima H., Yokota H. y Miyashita A. “The visualization and its analysis of combustion flame in DI diesel engine”. *SAE paper 980141*, 1998.
- [79] Fujimoto H.G. “No flame region in diesel combustion in quiescent atmosphere”. *Conference on thermo- and Fluid dynamic processes in diesel engines (THIESEL)*, 2006.
- [80] Payri F., Desantes J.M. y Pastor J.V. “LDV measurements of the flow inside the combustion chamber of a 4-valve D. I. diesel engine with axisymmetric piston-bowls”. *Experiments in fluids*, Vol. 22, pp. 118–128, 1996.
- [81] Suzuki T. y Shiozaki T. “A new combustion system for the diesel engine and its analysis via high speed photography”. *SAE paper 770674*, 1977.
- [82] Espey C. y Dec J.E. “Diesel engine combustion studies in a newly designed optical-access engine using high-speed visualization and 2-D laser imaging”. *SAE paper 930971*, 1993.

- [83] Werlberger P. y Cartellieri W.P. “Fuel Injection and Combustion Phenomena in a High Speed DI Diesel Engine Observed by Means of Endoscopic High Speed Photography”. *SAE paper 870097*, 1987.
- [84] Payri F., Pastor J.V. y Arrègle J. “Endoscopic high speed visualization of injection and combustion processes in a DI diesel engine”. *Entropie*, Vol. 200, pp. 7–15, 1996.
- [85] Ricart L.M., Xin J., Bower G.R. y Reitz R.D. “In-cylinder measurement and modeling of liquid fuel spray penetration in a heavy-duty diesel engine”. *SAE paper 971591*, 1997.
- [86] Desantes J.M., Arrègle J. y Pastor J.V. “Characterization of local fuel concentrations and internal dynamics in DI diesel sprays”. *SAE paper 970797*, 1997.
- [87] Arrègle J. *Análisis de la estructura y dinámica interna de chorros diesel*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1997.
- [88] Pastor J.V., Payri R., López J.J. y Juliá J.E. “Effect of injector nozzle geometry of diesel engines on the macroscopic spray characteristics by means of optical techniques”. *Fuel injection Systems Conference, IMechE*, 2003.
- [89] Payri F., Bermúdez V., Payri R. y Salvador J. “The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles”. *Fuel*, Vol. 83, pp. 419–431, 2004.
- [90] Desantes J.M., Payri R., Salvador F.J. y Soare V. “Study of the influence of geometrical and injection parameters on diesel sprays characteristics in isothermal conditions”. *SAE paper 2005-01-0913*, 2005.
- [91] Martínez S. *Desarrollo de una instalación experimental para el estudio de chorros diesel evaporados en atmósfera inerte y reactiva*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003.
- [92] Pastor J.V., García J.M., Pastor J.M. y Zapata L.D. “Visualization of the spatial and temporal evolution of a diesel flame”. *Fifth Symposium Towards Clean Diesel Engines. Lund, Sweden*, 2005.
- [93] Desantes J.M., Pastor J.M., Martínez S. y Riesco J.M. “Experimental characterization of the liquid phase penetration on evaporating diesel sprays”. *SAE paper 2005-01-2095*, 2005.

- [94] Pastor J.V., García-Oliver J.M., Pastor J.M. y Ramírez-Hernández J.G. “Experimental facility and methodology for systematic studies of cold startability in direct injection diesel engines”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, 2009.
- [95] González R.C. y Woods R.E. *Digital image processing*. Prentice Hall, 2nd ed., ISBN 0-201-18075-8, 2002.
- [96] Russ J.C. *The image processing handbook*. CRC press, 3rd ed., ISBN 0-8493-2532-3, 1998.
- [97] Lapuerta M., Armas O. y Gomez A. “Diesel particle size distribution estimation from digital image analysis”. *Aerosol Science and Technology*, Vol. 37, pp. 369–381, 2003.
- [98] Egmont-Petersen M., de Ridder D. y Handels H. “Image processing with neural networks—a review”. *Pattern Recognition*, Vol. 35, pp. 2279–2301, 2002.
- [99] Pal N.K. y Pal S.K. “A review on image segmentation techniques”. *Pattern Recognition*, Vol. 26, pp. 1277–1294, 1993.
- [100] Glasbey C.A. “An analysis of histogram-based thresholding algorithms”. *Graphical Models and Image Processing*, Vol. 55, pp. 532–537, 1993.
- [101] Duda R.O., Hart P.E. y Stork D.G. *Pattern classification*. Wiley, 2nd ed., ISBN 0-471-05669-3, 2001.
- [102] Fukunaga K. *Introduction to statistical pattern recognition*. Academic Press, 2nd ed., ISBN 0-12-269851-7, 1990.
- [103] Pastor J.V., Arrègle J., García J.M. y Zapata L.D. “Segmentation of diesel spray images with log-likelihood ratio test algorithm for non-Gaussian distributions”. *Applied Optics*, Vol. 46, pp. 888–899, 2007.
- [104] Shao J., Yan Y., Greeves G. y Smith S. “Quantitative characterization of diesel sprays using digital imaging techniques”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 14, pp. 1110–1116, 2003.
- [105] Klein-Douwel R.J.H., Frijters P.J.M., Somers L.M.T., Boer W.A. y Baert R.S.G. “Macroscopic diesel fuel spray shadowgraphy using high speed digital imaging in a high pressure cell”. *Fuel*, Vol. 86, pp. 1994–2007, 2007.

-
- [106] Bysveen M., Almås T., Ulvund K.A., Jørgensen A. y Kvinge F. “Development of a shadowgraph image technique describing the fuel spray behavior in rapid compression Machine”. *SAE paper 2004-01-2934*, 2004.
- [107] Cronhjort A. y Wåhlin F. “Segmentation algorithm for diesel spray image analysis”. *Applied Optics*, Vol. 43, pp. 5971–5980, 2004.
- [108] Seneschal J., Maurin B., Champoussin J.C. y Ducottet C. “A fully automatic system for the morphology characterization of high pressure diesel sprays”. *SAE paper 2004-01-0025*, 2004.
- [109] Pastor J.V., Arrègle J. y Palomares A. “Diesel spray image segmentation with a likelihood ratio test”. *Applied Optics*, Vol. 40, pp. 1–10, 2001.
- [110] Payri F., Pastor J.V., Palomares A. y Juliá J.E. “Optimal feature extraction for segmentation of diesel spray images”. *Applied Optics*, Vol. 43, pp. 2102–2111, 2004.

Capítulo 4

Visualización del chorro líquido

Contenido

4.1. Introducción	91
4.2. Configuración para la visualización de chorro líquido	91
4.2.1. Visualización con múltiples accesos	92
4.2.2. Visualización con acceso único	97
4.3. Procesado de imágenes de chorro libre isoterma . .	100
4.3.1. Pre-procesado de las imágenes	101
4.3.1.1. Inicio y lectura	101
4.3.1.2. Reconstrucción del color	102
4.3.1.3. Sustracción de fondo	104
4.3.1.4. Pre-segmentación y cálculo de los histogramas	104
4.3.2. Segmentación	106
4.3.2.1. Algoritmo LRT	107
4.3.2.2. Estimación estadística	109
4.3.2.3. Cálculo del umbral a priori y estimación de la PDF_S	116
4.3.2.4. Segmentación con el algoritmo 1D-LRT . .	118
4.3.2.5. Imágenes con información del color	122
4.3.3. Post-procesado	123
4.3.3.1. Eliminación de ruido y determinación del contorno	124
4.3.3.2. Post-procesado para la validación subjetiva de la calidad de la segmentación	126

4.3.3.3. Caracterización geométrica del chorro	129
4.3.3.4. Tratamiento estadístico de datos	131
4.4. Análisis de la robustez de los algoritmos	134
4.4.1. Configuración de la iluminación	134
4.4.2. Variación de la apertura del diafragma	137
4.5. Resumen y conclusiones	141
Bibliografía	145

4.1. Introducción

En este capítulo se describe la metodología propuesta para la visualización y caracterización macroscópica de chorros Diesel de toberas de múltiples orificios en instalaciones provistas con uno o más accesos ópticos amplios: maquetas isotermas de chorro libre con tres accesos y maquetas reactivas o motores ópticos con acceso único. Las imágenes obtenidas presentan unas características particulares que determinan el tipo de algoritmos empleados en su análisis por ordenador (chorros iluminados sobre fondos oscuros).

En primer lugar se realiza una descripción de la distribución de los dispositivos optoelectrónicos, según se cuente con uno o tres accesos ópticos para la visualización e iluminación. Las propiedades de las imágenes varían según la configuración y posición de los elementos del montaje, especialmente de los sistemas de iluminación. El núcleo del capítulo es la descripción de la secuencia completa de los algoritmos de procesamiento de las imágenes de chorro líquido (pre-procesado, segmentación y post-procesado). El algoritmo de segmentación propuesto se basa en el estudio y caracterización de los histogramas de las imágenes y la definición de un umbral óptimo con el uso de herramientas de reconocimiento de formas. El algoritmo es una extensión al LRT propuesto por Palomares [1] pero considerando otras funciones de probabilidad en la caracterización de los histogramas.

El planteamiento de las hipótesis para el desarrollo de los algoritmos se lleva a cabo tomando como ejemplo diferentes imágenes características de cinco y seis chorros con diferentes configuraciones de iluminación. Los casos elegidos son ampliados al final del capítulo para realizar una evaluación de la robustez de los algoritmos de procesamiento y análisis de las imágenes.

4.2. Configuración para la visualización de chorro líquido

La visualización de chorro líquido de toberas de múltiples orificios se lleva a cabo en instalaciones provistas con uno o más accesos ópticos amplios. Estas instalaciones fueron la maqueta isoterma de N_2 , el motor maqueta y el motor óptico transparente de los cuales se habló en § 3.4. Para la visualización en las diferentes instalaciones se definieron dos diferentes configuraciones según el número de accesos disponibles:

- Visualización de chorro líquido en maquetas de múltiples accesos.

- Visualización de chorro líquido en instalaciones con acceso único.

4.2.1. Visualización con múltiples accesos

La primera configuración fue definida para la visualización e iluminación a través de los tres accesos ópticos con los que cuenta la instalación de la maqueta isoterma de nitrógeno [2, 3] (ver figura 3.6). En la figura 4.1 se presenta la distribución de los diferentes elementos del montaje, tanto equipos optoelectrónicos (flash y cámara) como equipos de control (ordenador, sistema de sincronización, sistema remoto de periféricos, etc.). Como se observa en la figura, la radiación dispersada por los chorros, se registra a través del acceso frontal de la maqueta, mientras que la iluminación se lleva a cabo por las ventanas laterales. Todo el instrumental está sincronizado con el sistema de inyección: cuando sucede un evento de inyección, la unidad de control envía una orden al sistema de sincronización para que se produzcan las señales TTL programadas para el disparo de la cámara y los sistemas de iluminación. Una vez registrada la señal luminosa por el sensor de la cámara, esta se digitaliza de forma automática y se envía al ordenador donde se almacenan y visualizan las imágenes de los chorros.

La radiación generada por las dos fuentes de luz estroboscópicas (ver § 3.3), se conduce por medio de fibras ópticas al interior de la cámara de inyección. Una de las terminales de las fibras recoge la radiación generada por una lámpara de Xenón de gran intensidad y la conduce a la segunda terminal que se ubica cerca de las ventanas laterales de la maqueta. La luz sale de las fibras ópticas con un ángulo de cono de 80° penetrando dentro de la cámara de inyección e iluminando los diferentes chorros de la tobera.

La información de las imágenes será la radiación registrada por el sensor de la cámara y que ha sido dispersada por las gotas de combustible y otros elementos presentes en el interior de la maqueta (luz reflejada por las paredes y ventanas, dispersada por gotas de combustible remanente, etc.). La calidad de las imágenes dependerá tanto de la calidad de la iluminación como de la configuración óptica de los elementos del montaje.

Debido a la complejidad de estimar el comportamiento de la radiación dentro de la cámara donde ocurre el evento de inyección, se ha evaluado experimentalmente el efecto de la posición de las fibras ópticas de iluminación, en la calidad de las imágenes. Para ello, se definieron nueve puntos distantes del centro de las ventanas laterales y uno adicional en el eje de las mismas. La distribución de los puntos se puede observar en la figura 4.2. En los primeros seis puntos, las fibras se ubicaron paralelas al eje de las ventanas enfrentadas de

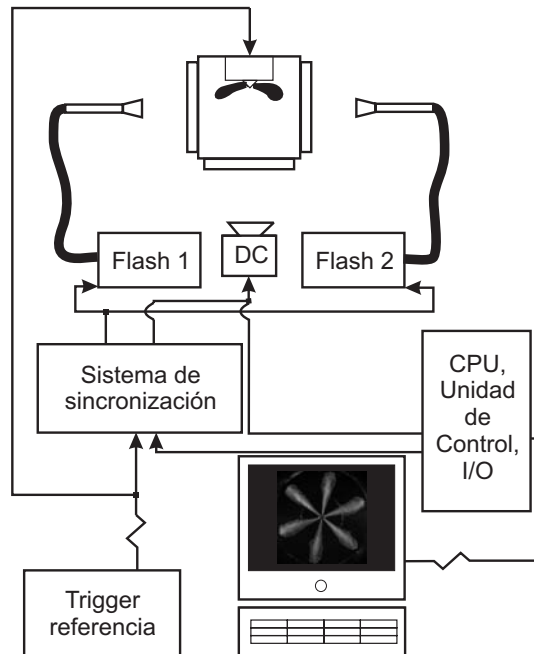


Figura 4.1: Esquema de la configuración para la visualización de toberas de múltiples orificios en instalaciones provistas con tres accesos ópticos.

80 mm de diámetro. En los cuatro últimos, las fibras se inclinaron un ángulo δ de 30° y 45° desde el eje de las ventanas al eje de visualización. Para guiar las fibras se construyeron dos piezas sobre las que se taladraron diferentes agujeros con el diámetro de las fibras y con los diferentes ángulos δ requeridos.

Para cada punto se registraron diferentes secuencias de imágenes con las mismas condiciones de inyección pero variando la posición de las fibras para la iluminación. Para la inyección se utilizó una tobera de cinco orificios tipo VCO y un tiempo de inyección de 1 ms. En cada secuencia se visualizó todo el evento de inyección tomando imágenes con intervalos de $100 \mu\text{s}$, y con un número de repeticiones de cinco imágenes por instante de tiempo ASOI. Las condiciones en cámara fueron de 4 MPa de contrapresión y temperatura ambiente constante de 300 K.

En todos los casos se observaron diferencias en las imágenes por la calidad de la iluminación de los chorros. Para compararlas se presentan diferentes imágenes en falso color (ver 4.3.3) correspondientes a un mismo tiempo de inyección ASOI. El tiempo corresponde al de un chorro desarrollado, sin que se presente choque contra las paredes de la instalación.

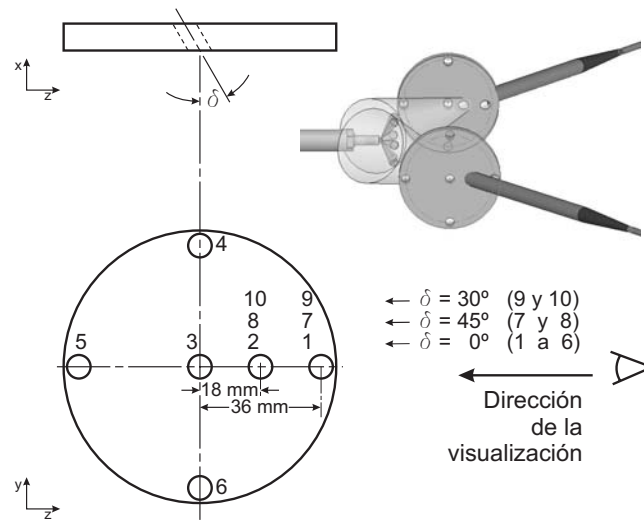


Figura 4.2: Esquema de posicionamiento de las fibras ópticas en las ventanas laterales de iluminación (vista lateral y superior). La fibra se inclina un ángulo δ respecto al eje de los accesos.

En la figura 4.3, puntos extremos superior (punto 4) e inferior (punto 6), se observan estas heterogeneidades. Concretamente, en el caso 4 el chorro inferior aparece más oscuro que los cuatro restantes, posiblemente por la sombra que hacen los chorros medios sobre él. Al mismo tiempo, en los chorros mejor iluminados, se observa una señal más intensa en el lado del chorro enfrentado a la fibra, haciendo sombra a su lado inferior. Por el contrario, en el punto 6 el chorro inferior se ve homogéneamente iluminado, no obstante el frente de los chorros medios parecen hacer sombra sobre las gotas más cercanas al inyector. Al mismo tiempo, se observan pérdidas de intensidad de la radiación y posibles pérdidas de información, en el frente de los chorros superiores. En ambos casos se observan importantes reflejos en la parte superior e inferior de la cámara de inyección, coincidiendo con la posición de las fibras.

Además de las configuraciones previas, se determinaron otros puntos perpendiculares a las ventanas laterales variando la distancia relativa entre el eje de salida de la fibra óptica y los chorros. Las imágenes ejemplo para estos casos se muestran en la figura 4.4 y corresponden a los puntos 1 y 2 los más alejados de la tobera, 3 en el centro de los accesos y 5 en el extremo de la ventana más cercano al inyector (ver figura 4.2).

En todos los casos la iluminación es más homogénea que en las configuraciones previas. No obstante, comparados con los chorros de los puntos 3 y 5,

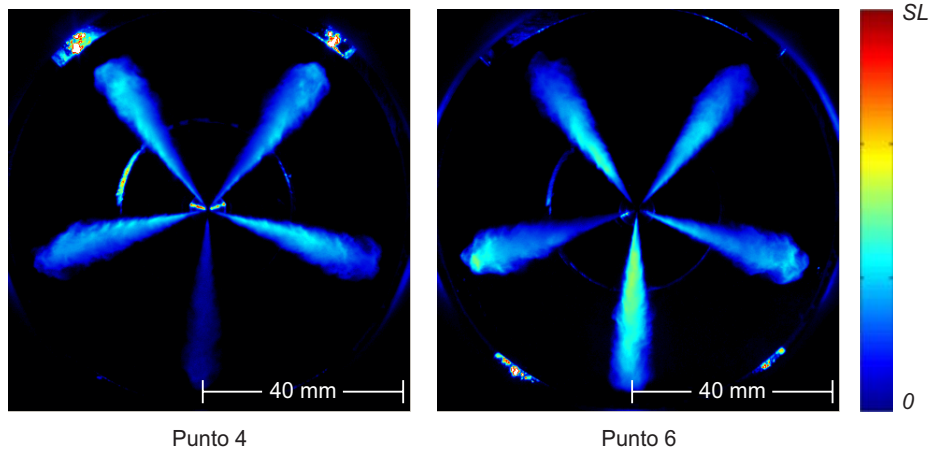


Figura 4.3: Ejemplo de imágenes de chorro Diesel posicionando las fibras ópticas en los extremos superior e inferior de las ventanas, puntos 4 y 6.

los de 1 y 2 parecen no visualizarse correctamente, dando una apariencia más fina. Nótese además como la parte más cercana a la tobera del chorro inferior en 2 parece poco iluminada posiblemente por la sombra que los chorros medios hacen sobre éste. Son estos mismos chorros medios los que en los puntos 3 y 5 se superponen a los rayos de luz directa (no reflejada), iluminándose mejor un lado del chorro al tiempo que hacen sombra sobre su cara interna. Este fenómeno se observa por la incidencia perpendicular del eje del haz radiante. Ya que este fenómeno no se observa para las posiciones más lejanas (1 y 2), se puede considerar que el frente de los chorros desarrollados se encuentra entre el extremo más cercano a la tobera y el eje de los accesos.

Buscando minimizar las sombras en los chorros sin perder información, se evaluaron otras configuraciones inclinando la fibra sin que se presentase una superposición importante del chorro a la luz. Las imágenes de los puntos 9 y 10 y 7 y 8 de la figura 4.5 fueron iluminadas posicionando las fibras $\delta = 30^\circ$ y $\delta = 45^\circ$, respectivamente. En la figura se observa un aumento en la intensidad de la radiación dispersada por los chorros para las configuraciones 9 y 10, llegando incluso a saturar en determinadas zonas de los chorros superiores de la última configuración. En esta posición, la radiación dispersada por las gotas de combustible parece provenir principalmente de la incidencia directa de los rayos de luz y menos de reflexiones en las paredes de la instalación.

Aunque una leve inclinación de las fibras parece mejorar las características de las imágenes, un aumento más acusado produce el efecto contrario como sucede para las configuraciones con $\delta = 45^\circ$. En estos casos, son menos los

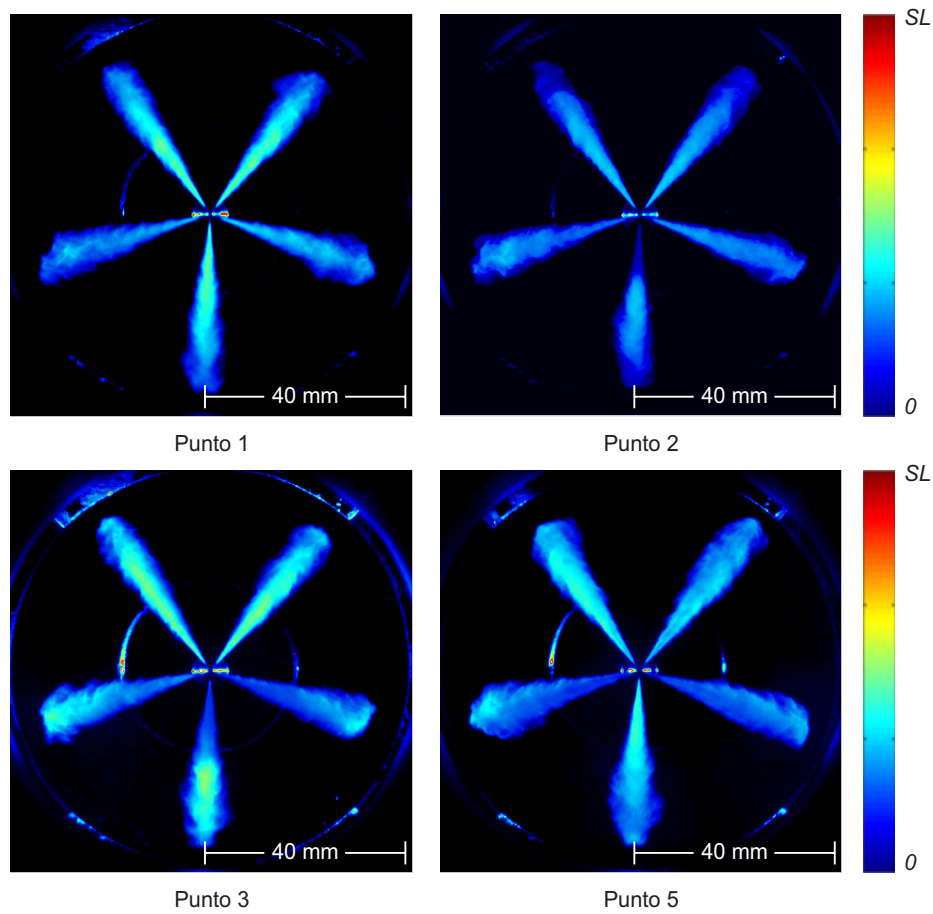


Figura 4.4: Imágenes de chorro Diesel iluminando con las fibras no inclinadas a diferentes distancias de la tobera de inyección. Puntos 1 y 2 los más alejados, 3 en el centro de los accesos y 5 el más cercano a la tobera.

rayos del haz que inciden directamente en los chorros. El punto 7, al estar más alejado de la tobera, permite que el haz se abra más antes de alcanzar las gotas de combustible o las paredes de la instalación. No obstante, para el punto 8 el camino recorrido por la radiación es más corto antes de impactar contra las paredes de la instalación. Son menos los rayos que inciden directamente en el chorro que se ilumina principalmente por la luz reflejada.

El análisis anterior muestra una gran variabilidad entre imágenes para unas mismas condiciones experimentales, en ocasiones con pérdidas de información por la incorrecta configuración en la iluminación. Estas características obligan a definir unas condiciones repetitivas y a definir unos algoritmos robustos pa-

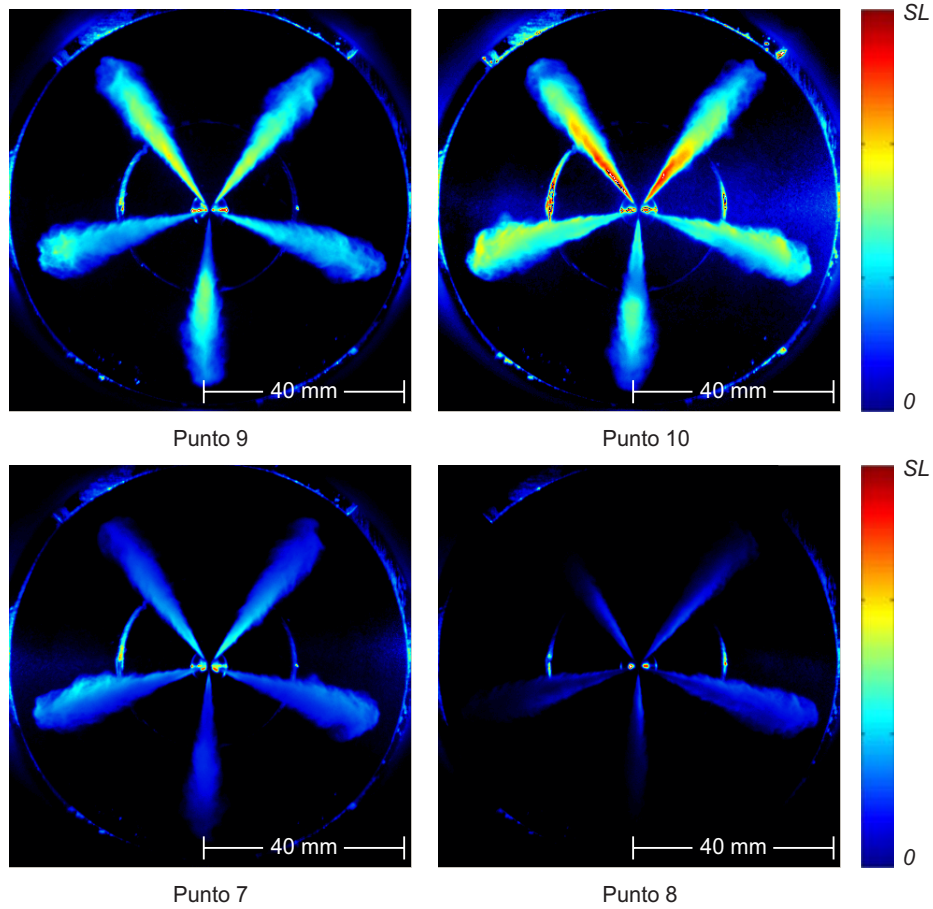


Figura 4.5: Imágenes de chorro Diesel iluminando con las fibras inclinadas $\delta = 30^\circ$ puntos 9 y 10 y $\delta = 45^\circ$ puntos 7 y 8.

ra el análisis automático de las imágenes. El análisis de estas imágenes con los algoritmos propuestos en este trabajo, se discuten en el apartado final del capítulo. En éste se analizará la sensibilidad de la metodología de procesamiento a las diferentes condiciones de iluminación y se validan las observaciones aquí realizadas.

4.2.2. Visualización con acceso único

La segunda configuración definida para el estudio de toberas con múltiples orificios, corresponde a la configuración para la visualización de chorro líquido en instalaciones con acceso único. Estas instalaciones son el motor maqueta y

el motor óptico transparente. El esquema de la configuración que se muestra en la figura 4.6 corresponde a la primera de ellas, aunque, esta puede ser fácilmente extrapolable a cualquier instalación con acceso único amplio.

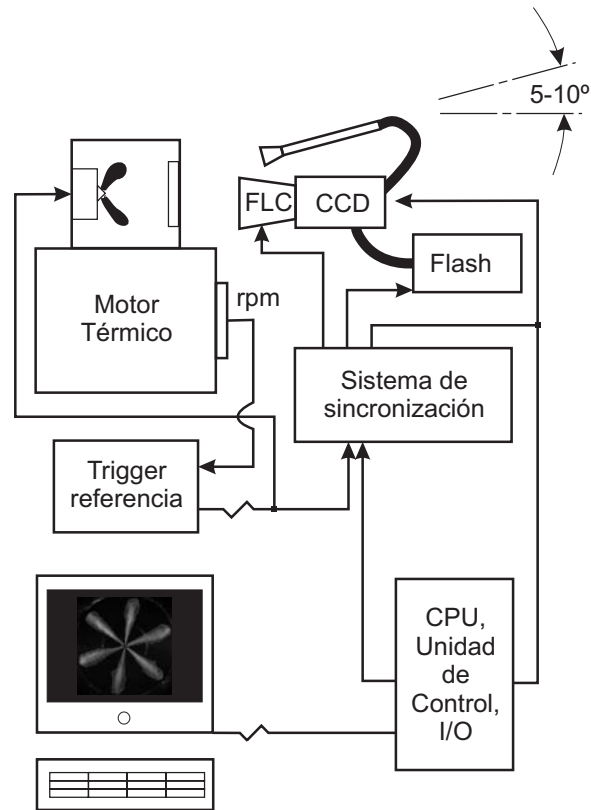


Figura 4.6: Esquema de la configuración para la visualización de toberas con múltiples orificios en instalaciones provistas con un acceso.

En la visualización de chorro líquido en condiciones reactivas, la intensidad de la luz dispersada por el chorro es mucho menor que la radiación emitida por la llama. Este fenómeno unido al estado de sensibilización en tiempo de descarga propio de las fotorreceptores CCD, produce manchas en las imágenes cuando la llama aparece después del registro de los chorros, fenómeno conocido como efecto 'smear'. Para solucionar este inconveniente se utilizó un obturador de cristal líquido o FLC ('Ferroelectric Liquid-Crystal Light Valve' Displaytech DR-95) cuya apertura o cierre es controlado por el mismo sistema de sincronización. El FLC se ubica entre el objetivo y el sensor de la cámara. A una señal eléctrica, y pasado un tiempo de respuesta del obturador, las moléculas de cristal líquido ferro-eléctrico se polarizan cerrando el paso de la

luz al interior de la cámara y por lo tanto a la CCD. La presencia del FLC afecta negativamente la calidad de las imágenes ya que su transmitancia es muy baja (30 % máxima en el rango 470-570 nm).

La iluminación para esta configuración es uno de los parámetros más críticos de la puesta a punto. Cuando los ejes de iluminación y visualización están cercanos al paralelismo y perpendiculares a las caras del único acceso con el que cuenta la instalación, las reflexiones que se producen en las ventanas alcanzan el sensor de la cámara saturando la imagen. Para evitar este inconveniente se varía la orientación de la fibra óptica utilizada en la iluminación respecto al eje óptico de visualización, de forma que los reflejos sean desplazados fuera del campo de visión del fotorreceptor.

Es bastante difícil encontrar la configuración óptima de posición de estos elementos de forma tal que se iluminen apropiadamente los chorros. En la configuración de la figura 4.6, el eje óptico de visualización de la cámara se conserva perpendicular a los planos de la ventana y soporte del inyector. El eje de iluminación se gira entre 5° y 10° respecto al eje de visualización. La posición óptima suele ser más difícil de definir en la instalación del motor óptico transparente (ver figura 3.5) por la mayor cantidad de elementos del montaje y el mayor camino óptico. Palomares [1] propone un valor entre 10° y 20° entre el eje de visualización y el eje de iluminación, pero en este caso modificando igualmente la posición del espejo y por lo tanto el ángulo del eje óptico de visualización.

El ángulo de cono de salida del haz de luz de la fibra óptica de 80° , se ha modificado, en algunos casos, mediante un sistema condensador como se esquematiza en la figura 5.5 del capítulo 5. El sistema condensador es una lente biconvexa de 25 mm de diámetro y 100 mm de focal, ubicada al frente de la punta de la fibra sobre un sistema especial de sujeción.

En la figura 4.7 se presentan dos imágenes características registradas en la instalación del motor maqueta. En la primera de las imágenes se puede observar en la parte superior un reflejo que se superpone a la radiación dispersada por uno de los chorros. Por el contrario en la imagen de la derecha la radiación reflejada por la ventana se encuentra fuera del campo de visión del fotorreceptor, mejorando el contraste entre el chorro y el fondo. En los dos casos, uno de los chorros se superpone a la radiación reflejada por el captador de presión, lo que produce un error en las medidas. Para este caso particular, los resultados de este sector fueron eliminados.

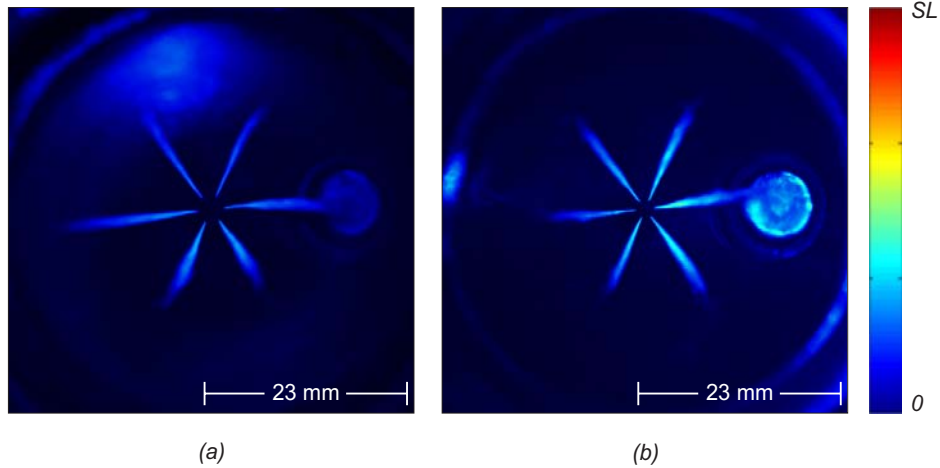


Figura 4.7: Ejemplo de dos imágenes según se visualizan los reflejos de la ventana o no. En (a) el reflejo observado en la parte superior de la imagen se superpone a uno de los chorros visualizados.

4.3. Procesado de imágenes de chorro libre isoterma

Debido al desarrollo de los nuevos sistemas de adquisición, el número de información obtenida en un estudio de visualización es cada vez mayor. Actualmente, para una misma secuencia⁷ es fácil registrar hasta 300 imágenes y más, sumado al número cada vez más alto de condiciones de ensayo que deben ser estudiadas. Así, si se quisiese estudiar tres diferentes toberas, con tres diferentes densidades dentro de la cámara y cuatro diferentes presiones de inyección, se tendría para un estudio más de 10000 imágenes que deben ser procesadas para obtener de ellas las características geométricas de cada chorro. Los sistemas de procesado digital automático permiten analizar todas estas imágenes dando como resultado la caracterización macroscópica del chorro con alto grado de precisión.

En las líneas siguientes se proporciona una descripción detallada paso a paso de los algoritmos desarrollados para el procesado digital de las imágenes

⁷Una secuencia es un número de imágenes registradas para diferentes instantes de tiempo ASOI en unas mismas condiciones de ensayo. En la visualización con sistemas CCD se graba una imagen por inyección, registrando un número de repeticiones para un mismo tiempo ASOI y avanzando hasta el término del proceso. En un sistema con cámara rápida se llevan a cabo diferentes tomas de una misma inyección, registrándose tantas inyecciones como repeticiones se requieran.

de chorro líquido de toberas de múltiples orificios. La disposición de los algoritmos sigue la estructura propuesta en el capítulo anterior de pre-procesado, segmentación y post-procesado (Ver § 3.5.1).

4.3.1. Pre-procesado de las imágenes

En el presente trabajo se han evitado el uso de algoritmos de pre-procesado, principalmente aquellos que modifican las propiedades de las imágenes. Los pocos algoritmos implementados en esta primera parte del proceso son los que tienen como función la obtención de características inmediatas de las imágenes como la lectura e interpretación de los ficheros tal cual son generados por los sistemas de adquisición (ficheros 'raw'), el cálculo de histogramas y la reconstrucción del color, así como algoritmos de pre-segmentación, y en casos especiales, de sustracción de fondo.

4.3.1.1. Inicio y lectura

El objetivo de un sistema automático de procesado es analizar un importante número de imágenes, obteniendo de ellas información precisa del fenómeno visualizado. Así, la interacción usuario-máquina debe ser mínima, limitada a la introducción de datos requeridos para el análisis. Estos datos aportan tanto información de la posición de los ficheros en la memoria del ordenador como de la posición del inyector en la imagen, el diámetro de la cámara de inyección, la posición relativa de los ejes de los chorros y la resolución espacial de la escena visualizada. Esta última es la relación entre el número de píxeles y las unidades métricas de longitud [píxel/mm]. Para su cálculo se requiere una imagen con un objeto de referencia ubicado en el plano de enfoque de los chorros.

La interpretación de las imágenes se consigue mediante la lectura de los ficheros generados por cada sistema de visualización. De esta forma se evitan las pérdidas de información ocasionadas por la compresión e interpolación que sucede al cambiar de formato digital.

El primer paso en la interpretación de las imágenes es la lectura de la cabecera del fichero fuente que contiene toda la información relevante para la construcción de las imágenes. Esta información es la resolución espacial (número de píxeles), la posición y valor en niveles digitales de cada píxel en la imagen, etc. Una vez leída la cabecera se procede a la interpretación de la imagen como una matriz de puntos $M \times N$, de coordenadas (x, y) con origen en $(0, 0)$. Se pretende mantener una correlación con la definición de imagen

digital de González y Woods [4], quienes definen la imagen digital como la función bidimensional $f(x, y)$:

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0, 0) & f(1, 0) & \cdots & f(M-1, 0) \\ f(0, 1) & f(1, 1) & \cdots & f(M-1, 1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(0, N-1) & f(1, N-1) & \cdots & f(M-1, N-1) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

donde x e y son la coordenadas espaciales de los píxeles y el valor de f , para cualquier par de valores (x, y) , es el nivel de intensidad o nivel digital.

4.3.1.2. Reconstrucción del color

La definición de imagen digital de la ecuación 4.1 es válida cuando se habla de imágenes en escala de grises. No obstante, cuando se habla de imágenes en color la construcción de la imagen suele variar en función del sistema de interpretación [5, 6]. Un ejemplo de ello se presenta en imágenes del espacio RGB donde se redefine la imagen digital como la suma de los vectores de color:

$$\vec{f}(x, y) = \vec{r}(x, y) + \vec{g}(x, y) + \vec{b}(x, y) \quad (4.2)$$

donde $\vec{r}(x, y)$, $\vec{g}(x, y)$ y $\vec{b}(x, y)$, son las componentes vectoriales de las matrices $R(x, y)$, $G(x, y)$ y $B(x, y)$ en las coordenadas espaciales x e y .

No todos los sistemas de visualización son capaces de discriminar entre los diferentes colores. Ya en el capítulo anterior en § 3.3.1, se comentaba como una cámara digital puede interpretar el color mediante la superposición de arreglos de filtros CFA a la matriz de sensores CCD o CMOS. De los sistemas mencionados en la tabla 3.1 la cámara PixelFly es la única provista de un arreglo CFA tipo Bayer, similar al de la figura 3.3. Esta información es muy importante cuando se visualiza la radiación térmica del hollín, que como se verá en el capítulo 6, emite en el rango visible del espectro electromagnético.

Antes de proceder a la segmentación de las imágenes, se debe calcular cada una de las matrices de color, cuando estas existan. Una imagen adquirida con un sistema provisto con CFA interpretada en escala de grises, muestra un patrón de malla como se expone en la figura 4.8. El efecto de mallado es causado por la presencia del arreglo de filtros CFA y por las variaciones de sensibilidad de los fotorreceptores a las diferentes longitudes de ondas que le inciden. La reconstrucción del color eliminará el efecto de malla del CFA, tanto en la imagen original como en el contorno fruto de la segmentación.

Palomares [1] propone un algoritmo de medias [4, 5] para minimizar el efecto del mallado en el procesado de las imágenes en formato original de la cámara; no obstante, este proceso elimina información que puede ser relevante para el análisis por lo que no se ha contemplado en este trabajo.

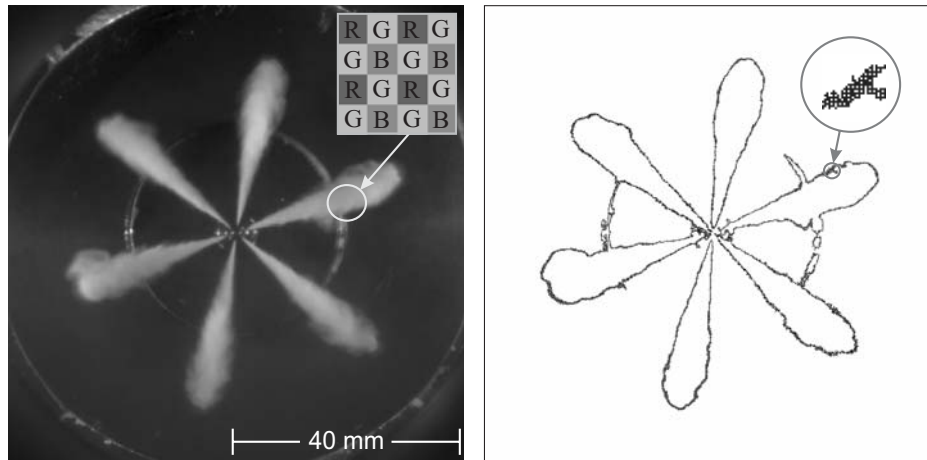


Figura 4.8: Imagen original en escala de grises grabada con una cámara digital con CFA. Un aumento en una zona iluminada de la imagen permite observar el patrón del arreglo de filtros CFA. Este patrón afecta el resultado de la segmentación como se observa en el contorno final.

En la literatura es posible encontrar un gran número de algoritmos para la reconstrucción del color en sistemas con arreglo de filtros CFA siendo el trabajo de Lukac *et al.* [7] un buen ejemplo de ello. En el presente trabajo, las componentes de las tres matrices de color $R(x, y)$, $G(x, y)$ y $B(x, y)$, se han calculado mediante un proceso de interpolación entre píxeles vecinos, asignando el componente *rojo* al píxel $(0, 0)$ según indicaciones del fabricante [8]. Continuando, se asigna el valor de cada color a su correspondiente matriz, las componentes matriciales sin filtro de color se obtienen como la media de los niveles digitales de los píxeles vecinos con información del correspondiente color.

Para ejemplificar este algoritmo se puede tomar un píxel con filtro de color azul (B) sobre el sensor. Si se pretende calcular las componentes de cada una de las matrices de $R(x, y)$, $G(x, y)$ y $B(x, y)$ se asigna el valor de la matriz original a $B(x, y)$. $G(x, y)$ será el valor medio de niveles digitales de los vecinos en horizontal y vertical y $R(x, y)$ el valor medio de niveles de los vecinos diagonales (ver figura 4.8).

4.3.1.3. Sustracción de fondo

Una característica de las imágenes de chorros Diesel es que el nivel digital de fondo no es perfectamente uniforme, debido tanto a las no homogeneidades en la iluminación como a la presencia de elementos dispersores como gotas de combustible remanente y reflejos en las superficies de la cámara de inyección.

Las operaciones que normalmente se utilizan para corregir estos problemas y mejorar así el contraste entre el chorro y el fondo, son la sustracción [3, 9, 10] o la división [11] de una imagen con chorros por una sin ellos. Las estrategias para obtener la imagen de fondo se generaliza mediante el registro de un número representativo de imágenes antes del inicio de la inyección, con el posterior cálculo de la imagen media de los fondos. El cálculo de la imagen media y la posterior sustracción a la imagen con chorro, se realiza píxel a píxel como se describe en la ecuación 4.3. Para evitar valores negativos en la sustracción, se adiciona a la imagen final sustraída un valor cercano al valor medio del rango dinámico de la imagen original ($DR/2 = 2048$ para una imagen de 12 bits).

$$f_{S_r}(x, y) = f_{S_o}(x, y) - f_B(x, y) + 2000 \quad (4.3)$$

La sustracción de fondo es un proceso irreversible por lo que su implementación no se ha considerado en la segmentación de imágenes de chorro líquido. Debido a las características de estas imágenes, con la sustracción se puede eliminar información importante del chorro. No obstante, el algoritmo se ha utilizado con éxito en el análisis automático de las imágenes Schlieren del próximo capítulo. En él se definirán sus características y el motivo de su elección.

4.3.1.4. Pre-segmentación y cálculo de los histogramas

Pre-segmentación

Para minimizar el efecto negativo de las no uniformidades del fondo sin eliminar información del chorro, es posible implementar algoritmos de pre-segmentación o ‘algoritmos adaptativos’ [12] en lugar de la sustracción. Para su implementación se divide la imagen en un número de sectores igual al número de chorros. Para cada sector se calculan las propiedades estadísticas y se define el nivel digital umbral de cada chorro. Si los chorros no se superponen unos sobre otros, los sectores se delimitan tomando como origen el centro de la tobera y radio el límite del campo de visión. El ángulo de cada sector es igual a $360^\circ/n$, con ‘n’ igual al número de chorros. Por otro lado, si se conoce la

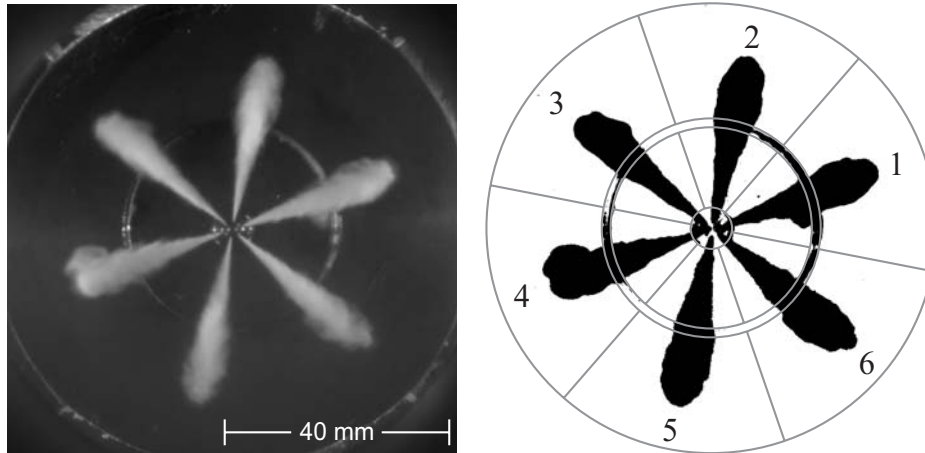


Figura 4.9: Pre-segmentación de una imagen de chorro Diesel en un número de sectores igual al número de chorros. Para cada sector se calculan las estadísticas para la segmentación ignorando la información de los reflejos.

distribución espacial de los reflejos en superficies como la tobera de inyección y los bordes o aristas de la geometría de la cámara, éstas se eliminan del sector para que no influya sobre la estimación de los parámetros estadísticos.

En la figura 4.9 se puede ver una imagen de seis chorros dividida en seis sectores cuyo radio es el de la cámara de inyección de la instalación de chorro libre isoterma. En este ejemplo, se observa un bisel en un radio intermedio de la cámara de inyección. En la posición del bisel se diseña un anillo dentro del cual estarán los píxeles que serán ignorados por los algoritmos de cálculo de umbral y posterior cuantificación de la geometría del chorro. Una máscara adicional con el diámetro de la tobera es igualmente programada para que su información no influya en los cálculos.

Cálculo de los histogramas

Los algoritmos de segmentación propuestos en este trabajo, definen un umbral que es el nivel digital que tienen los píxeles de la frontera entre las clases chorro y fondo. Este umbral se calcula a partir de los histogramas de los niveles digitales en cada sector. Para cada sector de imagen se tienen al menos un histograma para imágenes en escala de grises o tres para cada una de las matrices de color del espacio RGB. La caracterización de estos histogramas se lleva a cabo mediante la definición de ecuaciones matemáticas que se ajusten apropiadamente a su perfil. Un mayor número de histogramas aumenta la

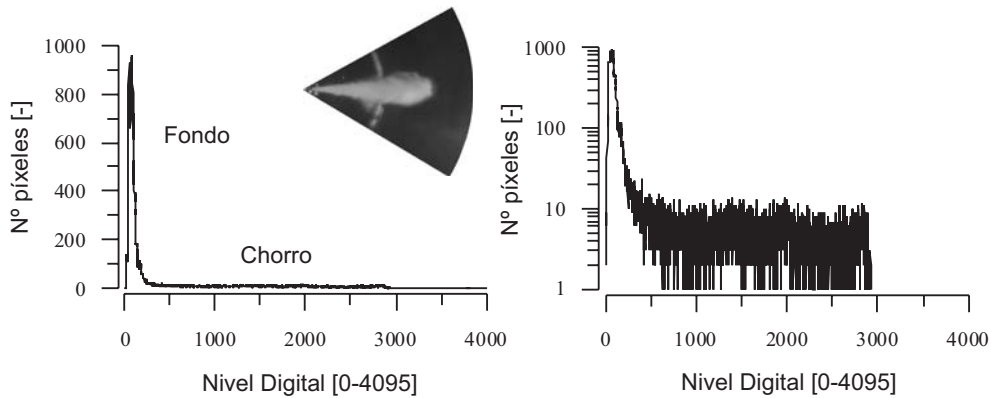


Figura 4.10: Histograma típico de un sector de una imagen de chorros. Con la representación en escala logarítmica del eje de la ordenada, se observa la gran dispersión de la distribución de luz por el chorro.

probabilidad de éxito en la caracterización de las distribuciones de clases.

El histograma se calcula contabilizando el número de píxeles de cada nivel digital en todo el rango dinámico de la imagen. En la figura 4.10 se muestra un histograma típico que se caracteriza por un marcado pico en los niveles digitales bajos que pertenecen al fondo de la imagen. Cambiando a escala logarítmica la representación del número de píxeles, se observa una gran dispersión en los niveles digitales altos correspondientes al registro de la luz dispersada por un chorro polidiserso con variación en la concentración de gotas de combustible.

4.3.2. Segmentación

La segmentación constituye una de las etapas más importante del procesado ya que permite dividir la imagen en un conjunto de clases representativas con características comunes. El diseño y desarrollo de los algoritmos más apropiados para tal fin, garantizan en un buen porcentaje el éxito en la caracterización del chorro Diesel en el proceso de visualización. En esta labor se ha centrado una buena parte de los esfuerzos dedicados al desarrollo de este trabajo, mediante el estudio de las características de las diferentes imágenes y sus histogramas para el posterior diseño y desarrollo de los algoritmos. Las imágenes que se han tomado como ejemplo corresponden a las de cinco chorros del punto 3 del estudio paramétrico del apartado 4.2, imágenes de seis chorros adquiridas igualmente en la maqueta de N_2 con dos configuraciones de diafragma e imágenes de seis chorros de la maqueta reactiva.

4.3.2.1. Algoritmo LRT

La problemática asociada a la implementación de algoritmos automáticos de segmentación basados en las técnicas de umbralización, es la correcta definición de las funciones que caractericen cada una de las clases presentes en las imágenes. El problema se agrava cuando las distribuciones de clases se superponen dificultando la definición de un valor de separación entre ellas. En los histogramas de este tipo de imágenes, la superposición supone un error intrínseco, ya que al definir un determinado valor de nivel digital como perteneciente a una clase, existe la probabilidad de que pertenezca a otra. Por este motivo se eligieron las herramientas de reconocimiento de patrones en el diseño de los clasificadores y el cálculo del valor óptimo del umbral para la segmentación de imágenes de chorro Diesel.

Probabilidad A priori

Desde un punto de vista teórico el mejor clasificador que existe es la llamada regla de decisión de Bayes [13, 14]. Se puede afirmar que en un sistema de reconocimiento y clasificación de patrones, existen C clases que son los elementos del sistema. La naturaleza aleatoria de las clases son entonces definidas por diversos vectores ω_i , con $i = 1, \dots, C$.

Si se observa una muestra x del sistema (un píxel en la imagen con un determinado nivel digital), es posible asumir que esta corresponde a la clase con mayor probabilidad de pertenencia, aunque exista una probabilidad no nula de pertenecer a otra clase. Así es posible determinar la existencia de un número de funciones igual al número de clases, conocidas como *Probabilidades a priori* $P(\omega_i)$ ('probabilidad de observar una clase ω_i en un sistema de reconocimiento de patrones'), donde:

$$\sum_{i=1}^C P(\omega_i) = 1$$

Ley de Bayes del mínimo error

Considerando los rasgos característicos de las imágenes, es posible minimizar el error de estimación a priori. Los histogramas de las imágenes, facilitan la definición de las funciones características de las clases, definidas como $p_i(x)$, que en la mayoría de las aplicaciones suelen ser funciones de densidad de probabilidad (PDF) características de la distribución de la radiación dispersada por los objetos.

Conocidas las probabilidades a priori y las funciones características de las clases, su producto da como resultado la probabilidad que existe de evaluar una determinada muestra x , y de que esta pertenezca a uno de los vectores ω_i :

$$p_i(x, \omega_i) = p_i(x)P(\omega_i) \quad (4.4)$$

Considerando los histogramas como la suma de cada una de las funciones características, y aplicando el teorema de Bayes de ‘probabilidad conjunta muestra-clase’ definida en la ecuación 4.4, es posible calcular la ‘función de densidad de probabilidad incondicional’ (ecuación 4.5), que en un sistema de reconocimiento de patrones sería la probabilidad de pertenencia de la muestra x a cualquier clase ω .

$$p(x) = \sum_{i=1}^C p_i(x, \omega_i) = \sum_{i=1}^C p_i(x)P(\omega_i) \quad (4.5)$$

En el caso de imágenes de chorro Diesel como sistema de reconocimiento simple de dos clases, las clases serán el chorro (S, por ‘spray’ en inglés) y el resto de objetos en la escena (reflejos, nubes de gotas, partículas dispersas en el fluido atmosférico, etc.) conocido como fondo (B, por ‘background’ en inglés). Las probabilidades a priori se designan como P_S para chorro y P_B para fondo, y su relación P_S/P_B refleja el conocimiento a priori de pertenencia de los píxeles de la imagen a cada una de las clases. La ecuación 4.5 expresada en términos de S y B se presenta como:

$$p(x) = p_S(x)P_S + p_B(x)P_B \quad (4.6)$$

De la teoría del error de estimación de Bayes, o ley de Bayes del mínimo error, el valor global del error de estimación (ε) se calcula como la suma de las funciones de probabilidad de selección errónea de las muestras [14], es decir, la probabilidad de clasificar un punto de la clase B como perteneciente a la clase S y viceversa:

$$\varepsilon = P_S \int_{-\infty}^T p_S(x)dx + P_B \int_T^{\infty} p_B(x)dx \quad (4.7)$$

donde a la clase B pertenecerán los valores por debajo de T, mientras que los valores de nivel digital superiores a T serán de S.

Test de máxima verosimilitud (LRT)

En el caso de un sistemas de reconocimiento de patrones de dos clases, la comparación de las ‘probabilidad conjunta muestra-clase’, que es la relación directa de las probabilidades a posteriori conocido como *Teorema de Bayes* [14], da como resultado la expresión de comparación de probabilidades entre clases:

$$p_S(x, S) > p_B(x, B) \longrightarrow x \in \text{clase } S \quad (4.8)$$

en caso contrario $x \in B$.

Tomando la expresión de la ecuación 4.4 y la relación de ecuación 4.8 es posible obtener la siguiente expresión:

$$\ell(x) = \frac{p_B(x)}{p_S(x)} > \frac{P_S}{P_B} \rightarrow x \in \text{clase } S$$

donde $\ell(x)$ es la función de máxima verosimilitud.

En muchas ocasiones es más cómodo usar el logaritmo de $\ell(x)$ debido a los términos exponenciales que suelen aparecer en las funciones de densidad de probabilidad. Esta función se conoce con el nombre de función discriminante de Bayes o test logarítmico de máxima verosimilitud ($h(x)$) con $\ln \frac{P_S}{P_B}$ el umbral de decisión a priori.

$$h(x) = -\ln \ell(x) = -\ln p_S(x) + \ln p_B(x) > \ln \frac{P_S}{P_B} \rightarrow x \in S \quad (4.9)$$

en caso contrario $x \in B$.

La igualdad de la expresión permite determinar el valor óptimo del umbral entre las clases chorro y fondo que minimizan el error de estimación. Si se derivan los miembros de las ecuaciones en 4.7 y se iguala a cero la expresión, se obtiene el valor optimo de umbral T con el mínimo error de estimación.

$$-\ln p_S(T) + \ln p_B(T) = \ln \frac{P_S}{P_B} \quad (4.10)$$

4.3.2.2. Estimación estadística

La tarea más compleja de cara al proceso de segmentación es la caracterización de los histogramas de las imágenes mediante la correcta definición de las funciones de clases $p_S(x)$ y $p_B(x)$. La caracterización de los histogramas se puede llevar a cabo considerando diferentes funciones de probabilidad (PDF)

cuya suma represente la distribución total $p(x)$. En el antecedente directo del presente trabajo se consideraba las distribuciones de clases normalmente distribuidas, tanto para el chorro como para el fondo [1, 15]. No obstante, los histogramas de las nuevas imágenes no siempre presentan esta característica de normalidad o simetría propia de la PDF.

En la literatura es posible encontrar un gran número de funciones de probabilidad utilizadas en aplicaciones de reconocimiento de formas y patrones [13, 14]. En el presente trabajo se consideraron tres funciones particulares para la caracterización de la distribución de fondo: la función normal o gaussiana, la función log-normal y la función gamma.

- La función normal o gaussiana es la PDF más ampliamente utilizada en la caracterización de distribuciones de clases tanto en aplicaciones de estadística como de reconocimiento de patrones. Esta es una función fácil de modelar, caracterizada por su media μ y desviación estándar σ como puede apreciarse en la ecuación 4.11, donde x son los valores del nivel digital del histograma.

$$\text{PDF}_N(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (4.11)$$

La apariencia gráfica de la distribución gaussiana es una curva simétrica en forma de campana que se extiende infinitamente a ambos lados de su media μ .

- Si una distribución de datos no es gaussiana, pero el logaritmo de los datos sigue una distribución normal, la PDF representativa de la distribución se conoce como función log-normal. Matemáticamente se define con la ecuación 4.12:

$$\text{PDF}_{\ln}(x) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \mu}{\sigma} \right)^2 \right], \quad \forall x > 0 \quad (4.12)$$

El perfil de la distribución presenta sesgo positivo, con la moda menor que la media y una larga cola que se extiende a la derecha. Las funciones con sesgo positivo suelen utilizarse en la caracterización de distribuciones de mayor sensibilidad a la variación de los niveles bajos del histograma, lo que sucede al aumentar el rango dinámico de la imagen. Al igual que la función normal, la log-normal esta caracterizada por la media μ y

desviación estándar σ , pero en este caso calculados para el logaritmo de los niveles digitales.

- Otra función de probabilidad con sesgo positivo es la función de distribución gamma, mucho más flexible desde el punto de vista de los perfiles de forma de la curva. Los parámetros característicos de la función son los factores de forma α y de escala θ , expuestos en la siguiente ecuación:

$$\text{PDF}_{\Gamma}(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\theta^{\alpha}} x^{(\alpha-1)} \exp(-x/\theta), \quad \forall x, \alpha, \theta > 0 \quad (4.13)$$

donde $\Gamma(\alpha)$ es el valor de la función gamma evaluada en α y cuyos valores se pueden encontrar fácilmente en tablas de estadística y textos de reconocimiento de patrones [14].

Existen algunos casos particulares de la función de distribución gamma en función de los valores que puedan tomar los parámetros característicos. Uno de ellos se presenta cuando $\alpha \leq 1$ donde la distribución adquiere un perfil en forma de ‘J’ inversa con un valor máximo asintótico en ‘0’, similar a la forma de algunos histogramas de imágenes de chorro Diesel. Simplificando la ecuación 4.13 con $\alpha = 1$ y $\Gamma(\alpha = 1) = 1$, se tiene la ecuación 4.14 que es un caso particular de la PDF_{Γ} , conocida como la función de densidad exponencial negativa PDF_{exp} .

$$\text{PDF}_{\text{exp}}(x) = \frac{1}{\theta} \exp(-x/\theta), \quad \forall x, \theta > 0 \quad (4.14)$$

Desde el punto de vista computacional, el tratamiento de la función de densidad de probabilidad gamma tiene un coste mayor comparado con las distribuciones gaussiana y log-normal, debido a la gran variedad de posibles combinaciones de los valores α y θ que definen la forma de la distribución.

En la estimación y caracterización de los histogramas se retoman las observaciones realizadas en la figura 4.10 —el marcado pico de niveles digitales bajos, los cuales pertenecen al fondo, y la gran dispersión de los niveles pertenecientes al chorro—. De esta manera se puede determinar la función que mejor se ajusta a los niveles bajos del histograma, los de mayor frecuencia, que define la distribución de la clase fondo $\text{PDF}_B(x)$. De la estimación se espera un error intrínseco de selección, debido a la presencia y superposición de la

distribución de la clase chorro $\text{PDF}_S(x)$ ⁸, a la del fondo (existen píxeles que pertenecen al fondo con niveles digitales similares a los del chorro).

En este trabajo, el proceso de estimación de los parámetros característicos de las funciones de probabilidad de imágenes en las que el fondo presenta valores bajos de intensidad y los píxeles del chorro niveles digitales más altos, se realiza como sigue:

- En el primer paso se parte de la hipótesis de normalidad de la distribución de la clase fondo. Para ello, se calcula la media (μ_B) de la distribución de los valores de nivel digital con frecuencias superiores a los valores de una función normal temporal entre sus puntos de inflexión. Los parámetros de la función temporal se determinan del valor máximo del histograma (moda) y la desviación de los puntos a su izquierda. De esta manera se evitan errores de estimación por la presencia de mini-máximos locales de máxima frecuencia en el histograma como los que se aprecian en la figura 4.11 (a). La desviación estándar de la función (σ_B) se calcula desde el valor digital 0 hasta μ_B , suponiendo simetría.
- El segundo paso en la estimación estadística, evalúa el ajuste del histograma a una función de distribución Log-normal, PDF_{\ln} . La estimación se lleva a cabo de manera similar al de la distribución gaussiana, pero en este caso la interpretación de los niveles digitales se hace en escala logarítmica.
- Por último, se evalúan, mediante un proceso iterativo, diferentes parejas de parámetros característicos α_B y θ_B cuya moda sea la de la distribución normal o log-normal (la que mejor se ajuste al histograma). De esta manera se asume que la moda de la PDF_Γ es el nivel digital esperado de mayor presencia en la imagen. De las diferentes parejas posibles α_B y θ_B , se elijen las que mejor modelen el histograma.

Los pasos anteriores son posibles cuando se pretende caracterizar histogramas con forma clara de campana (simétrica o no). No obstante, existen algunos casos particulares con forma de ‘J’ inversa como el de la figura 4.11(c). Se consideran los histogramas con esta forma aquellos cuyo nivel digital de máxima frecuencia se encuentra en cero o en los primeros cinco niveles. La caracterización de estos histogramas se lleva a cabo evaluando diferentes valores del factor de escala, θ_B , hasta encontrar una única PDF_B exponencial negativa, que se ajuste apropiadamente al histograma.

⁸Las funciones de densidad de probabilidad $\text{PDF}_S(x)$ y $\text{PDF}_B(x)$, son las funciones características de las clases $p_S(x)$ y $p_B(x)$ en los histogramas de las imágenes de chorro líquido.

Calculados los parámetros característicos de cada una de las cuatro diferentes funciones de probabilidad posibles (normal, log-normal, gamma o exponencial), se elige la PDF más apropiada para la caracterización de los niveles bajos en el histograma, y por ende de la clase fondo PDF_B . La función característica será la que mejor se ajusta al histograma mediante la evaluación la correlación lineal entre los valores de la PDF que se está validando y los valores de frecuencia del nivel digital (número de píxeles por nivel $pc(x)$). La evaluación de la correlación lineal se consigue mediante la obtención del coeficiente R^2 (ecuación 4.15), gracias a que este valor es poco influenciado por los niveles de chorro debido a su gran dispersión y poca frecuencia.

$$R^2 = \frac{n(\sum PDF(x)pc(x)) - \sum PDF(x) \sum pc(x)}{\sqrt{\left[n \sum PDF(x)^2 - (\sum PDF(x))^2\right] \left[n \sum pc(x)^2 - (\sum pc(x))^2\right]}} \quad (4.15)$$

Para ejemplificar lo anterior se muestran en la figura 4.11 diferentes tipos de histogramas característicos correspondientes a imágenes con diferentes configuraciones de iluminación:

- En los casos (a) y (b), la luminosidad de las imágenes de chorros de toberas de seis orificios, fue controlada mediante el uso de dos configuraciones de apertura del diafragma del objetivo fotográfico. Este abanico se amplía en § 4.4 donde se analiza el efecto de esta variable en los resultados de la segmentación de una secuencia completa.
- En (c), el histograma corresponde a uno de los chorros de una tobera de cinco orificios (punto 3 del estudio paramétrico de § 4.2), inyectando sobre un fondo poco dispersor posiblemente debido a la poca presencia de combustible remanente en la atmósfera.
- Para el último caso se visualiza una tobera de seis orificios en condiciones reactivas en la instalación con acceso único.

En los histogramas mostrados en la figura 4.11, los niveles digitales bajos corresponden a la distribución que se asume es fondo, y sobre cada uno de los histogramas se superponen las funciones estimadas gaussiana y gamma. Se observa un mejor ajuste en los valores digitales a la izquierda del máximo, como era de esperar, ya que son los datos que se han utilizado para estimar la PDF. En valores a la derecha del máximo (aún pertenecientes a la distribución de fondo, lejos todavía de los valores del chorro), la PDF_N , especialmente para

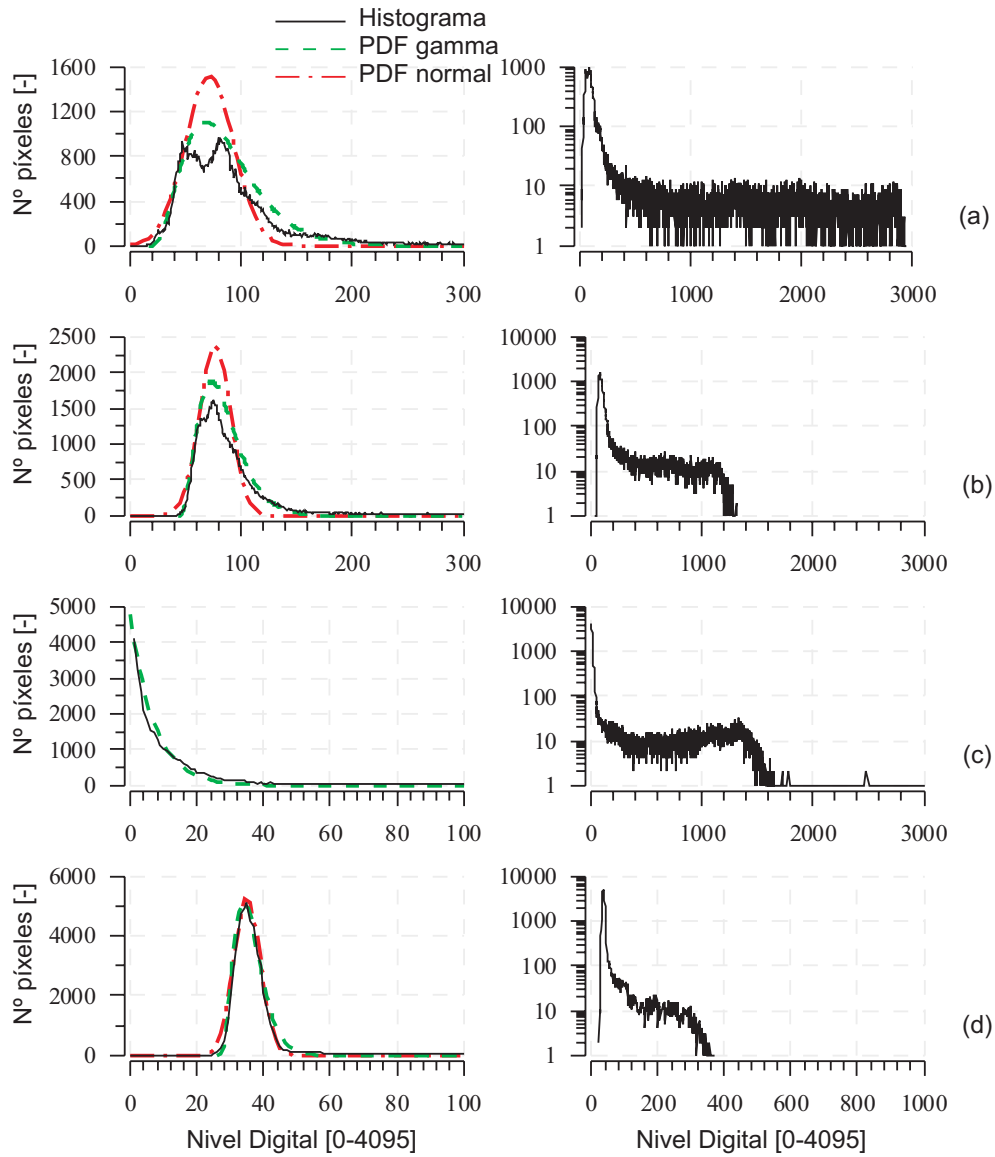


Figura 4.11: Histogramas característicos de chorro Diesel con diferencias en la iluminación: (a) y (b) luminosidad controlada por diafragma, (c) inyectando sobre un fondo poco dispersor y (d) inyectando en una atmósfera reactiva. La doble representación (lineal o logarítmica) permite identificar la forma en los niveles digitales bajos y la forma aleatoria de la distribución del chorro. Se superponen las PDF_B normal y gamma en la representación lineal.

los ejemplos (a) y (b), queda claramente por debajo del histograma lo que se traduce en un peor ajuste (R^2 menor). En el caso del histograma de la imagen registrada en condiciones reactivas en la instalación del motor maqueta, ambas funciones muestran un ajuste similar, aunque en un rango de niveles digitales muy inferior al de los otros casos.

En el lado derecho de la figura, la ordenada de la gráfica se muestra en escala logarítmica, resaltando la dispersión de los niveles digitales altos (chorro) y el rango dinámico efectivo (EDR) de cada sector de imagen. En los tres primeros casos el valor máximo de nivel digital se encuentra por encima del valor de 1000 gracias a las facilidades de iluminación de la instalación. En los casos (a) y (c) el rango es mayor ya que la configuración del diafragma permite pasar mayor cantidad de luz. Lo que no sucede en el caso (b) donde se utiliza un diafragma más cerrado. En el último de los casos, debido a las dificultades experimentales, el rango dinámico efectivo es muy estrecho por lo que la imagen se encuentra registrada solo en los primeros 400 niveles digitales, de los 4096 disponibles.

Los valores de la evaluación del ajuste lineal entre los histogramas y las dos funciones superpuestas se muestran en la tabla 4.1 donde se aprecia poca diferencia entre los valores del coeficiente R^2 . No obstante, los contornos obtenidos para cada caso varían significativamente, especialmente para los dos primeros casos como se muestra en la figura 4.12. Se observa una sobrestimación del contorno del chorro cuando se consideran los casos con PDF_B normal (contorno negro) o gamma (contorno blanco). Esta sobrestimación es especialmente importante en el caso con mayor luminosidad y EDR, caso (a). Nótese como en las proximidades de la tobera el contorno tiende a detectar la forma del sector de la pre-segmentación si se considerase el fondo normalmente distribuido.

Para ampliar esta observación, se muestran los resultados del procesado de una secuencia de imágenes completa con la configuración del primer caso. Es-

Tabla 4.1: Coeficiente R^2 que evalúa el ajuste lineal entre el valor de la PDF y el número de píxeles de los niveles digitales $pc(x)$, para los casos de la figura 4.11.

Caso	PDF gaussiana	PDF gamma
(a)	0.9551	0.9770
(b)	0.9701	0.9946
(c)	—	0.9911
(d)	0.9875	0.9942

ta secuencia que consta de imágenes de chorro Diesel para diferentes tiempos ASOI, en intervalos de $100 \mu s$ y 5 repeticiones por instante de tiempo, se han procesado considerando las PDF_B gaussiana o la que mejor se ajuste al histograma. En los resultados de penetración que se presentan en la figura 4.13, se observan sutiles diferencias de los valores medios de aproximadamente 1 mm. En cuanto a las medidas de ángulo, las diferencias son más importantes, lo que confirma lo comentado anteriormente para la figure 4.12 de que la hipótesis de normalidad de la distribución, si no se cumple, suele llevar a una sobrestimación del contorno.

4.3.2.3. Cálculo del umbral a priori y estimación de la PDF_S

La definición de las funciones características de clases $p_S(x)$ y $p_B(x)$ de los histogramas de las imágenes de chorros Diesel, requieren un conocimiento a priori de la correspondencia de píxeles a cada clase. Con la definición de la PDF_B que mejor se ajuste a los niveles bajos del histograma y que caracteriza la forma de la distribución de fondo, es posible mediante un análisis de la distribución, realizar una estimación a priori del valor de umbral que será el punto de partida para el cálculo de la distribución del chorro (PDF_S). Este

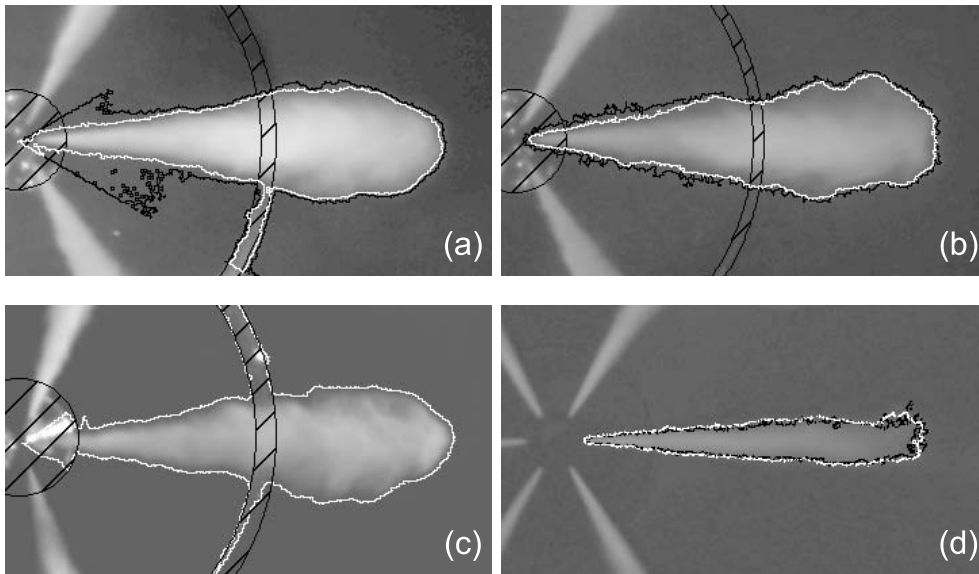


Figura 4.12: Imágenes características correspondientes a los histogramas de la figura 4.11. Los contornos superpuestos en negro y blanco corresponden a la segmentación con LRT gaussiano y gamma, respectivamente.

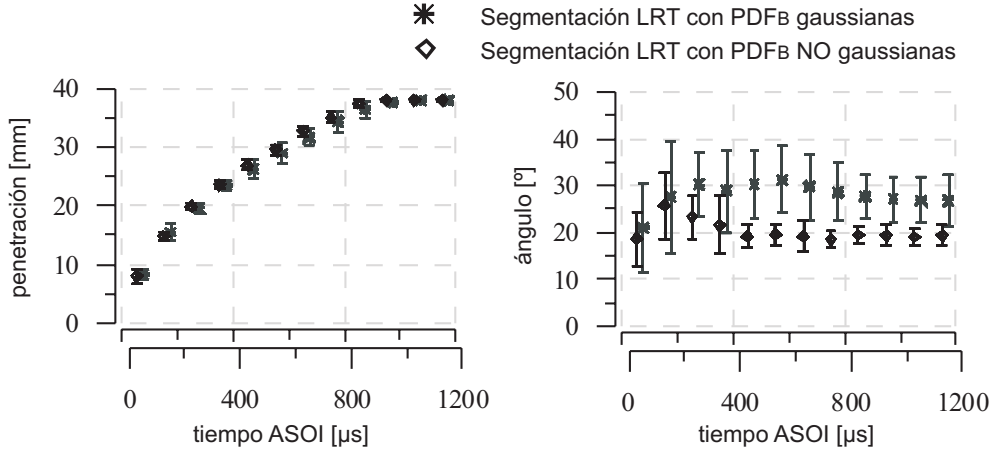


Figura 4.13: Comparación entre la penetración y ángulo promedio de las medidas en contornos calculados con el algoritmo LRT para PDF_B gaussianas o la que mejor se ajusta al histograma. Se han desfasado los valores de tiempo para la mejor presentación de los resultados.

valor se denomina en este trabajo como ‘umbral a priori’ y se expresa como T_{ap} .

El valor de T_{ap} se calcula a partir de la función de distribución acumulada (CDF) de la PDF_B , integrando esta última hasta alcanzar un valor aproximado del 97%. Este valor es una garantía estadística de que aproximadamente el 97% de los píxeles con los valores de nivel digital de mayor aparición, serían clasificados como pertenecientes a la clase fondo. Para la elección de este valor se evaluaron los resultados al calcular el umbral T_{ap} en un rango entre el 97% y el 99%, equivalentes a $\mu_B + 2\sigma_B$ y $\mu_B + 3\sigma_B$ para una distribución gaussiana, sin observarse diferencias importantes entre valores extremos.

El valor de T_{ap} ha sido utilizado por algunos autores [16, 17] como umbral de selección en la segmentación de imágenes con histogramas normalmente distribuidos. De forma análoga a la definición del umbral a priori del presente trabajo, estos autores definen el valor de contorno por medio de la relación:

$$T_{ap} = \mu_B \pm k \cdot \sigma_B \quad (4.16)$$

donde k es un factor de estimación experimental y el signo de la ecuación se define según la distribución con el pico característico se encuentre en los niveles altos (−) o bajos (+) del histograma. En el siguiente subapartado se muestran los resultados comparativos de la segmentación de las imágenes de

chorro Diesel con umbral a priori o con el umbral calculado con el algoritmo 1D–LRT, que considere ambas distribuciones de clases y los posibles errores de selección.

Para la estimación estadística de la función de distribución del chorro (PDF_S) se recurre de nuevo a las observaciones realizadas en la figura 4.10 que muestran una gran dispersión de los niveles digitales de esta clase. Además se observa una gran diferencia entre las distribuciones de fondo y chorro con una mayor dispersión para el chorro ($\sigma_S \gg \sigma_B$), especialmente en imágenes con un rango dinámico efectivo alto. Por otro lado, en la figura no se observa una forma clara de la distribución del chorro que pueda ser caracterizada fácilmente por una función de distribución estadística, por lo que se caracteriza la distribución del chorro en términos de μ_S y σ_S con los valores a derecha de T_{ap} en el histograma.

Reforzando la afirmación anterior se presenta en la tabla 4.2 los resultados de valor medio de umbral a priori T_{ap} y desviación estándar de la estimación estadística para diferentes secuencias de imágenes en las condiciones de los casos planteados previamente. Estos casos abarcan en gran medida los diferentes tipos de imágenes tratadas en este trabajo, casos correspondientes a una secuencia típica de un estudio de visualización. Las secuencias se registraron para diferentes tiempos de desarrollo del chorro, en intervalos de 50 μs y 5 repeticiones por instante de tiempo ASOI. Nótese que los valores característicos aquí registrados fueron calculados para cada sector de imagen.

Tabla 4.2: Valores medios de umbral a priori y desviación estándar de las clases chorro y fondo para cuatro casos con diferentes tipos de imágenes.

	Caso	T_{ap}	σ_S	σ_B
(a)	140 imágenes procesadas	284	490	26
(b)	140 imágenes procesadas	146	261	15
(c)	130 imágenes procesadas	100	588	12
(d)	55 imágenes procesadas	108	34	12

4.3.2.4. Segmentación con el algoritmo 1D–LRT

Un buen proceso de selección debe considerar todas las distribuciones de clases presentes en el sistema de clasificación. En el caso de histogramas de chorro Diesel la selección del nivel digital umbral óptimo (T) para la segmentación, debe considerar además de la distribución de la clase fondo, la de la clase

chorro. De acuerdo con el test logarítmico de máxima verosimilitud desarrollado previamente para un sistema de dos clases (ecuación 4.10) si existen dos funciones de densidad de probabilidad, PDF_S y PDF_B , que modelen correctamente la distribución de la luz por las clases, se puede remplazar las funciones características $p_S(x)$ y $p_B(x)$ de la ecuación por las funciones de probabilidad de cada clase. Reemplazando se llega a la expresión de la ecuación 4.17.

$$-\ln PDF_S(T) + \ln PDF_B(T) = \ln \frac{P_S}{P_B} \quad (4.17)$$

donde T es el valor de nivel digital que minimiza la probabilidad de error en la selección de un píxel que pertenezca a la clase chorro como perteneciente a la clase fondo, o viceversa.

Reemplazando cada una de las funciones de densidad de probabilidad por sus respectivos valores característicos e igualando a cero la expresión es posible calcular el umbral óptimo de segmentación T. Las funciones de probabilidad serán la PDF_B que mejor se ajuste al histograma en los niveles digitales de mayor frecuencia y la PDF_S expresada en términos de μ_S y σ_S a partir de los niveles digitales por encima de T_{ap} . De ello se obtienen las expresiones matemáticas del algoritmo 1D-LRT para las diferentes funciones de densidad presentadas anteriormente:

$$N \quad \frac{(T - \mu_B)^2}{2\sigma_B^2} - \frac{(T - \mu_S)^2}{2\sigma_S^2} + \ln \left(\frac{\sigma_B P_S}{\sigma_S P_B} \right) = 0 \quad (4.18)$$

$$Ln \quad \frac{[\ln(T) - \mu_B]^2}{2\sigma_B^2} - \frac{(T - \mu_S)^2}{2\sigma_S^2} + \ln \left(\frac{T \sigma_B P_S}{\sigma_S P_B} \right) = 0 \quad (4.19)$$

$$\Gamma \quad \frac{T}{\theta_B} - \frac{(T - \mu_S)^2}{2\sigma_S^2} + \ln \left(\frac{\Gamma(\alpha_B) \theta_B^{\alpha_B}}{T^{(\alpha_B-1)} \sigma_S \sqrt{2\pi}} \frac{P_S}{P_B} \right) = 0 \quad (4.20)$$

$$E \quad \frac{T}{\theta_B} - \frac{(T - \mu_S)^2}{2\sigma_S^2} + \ln \left(\frac{\theta_B}{\sigma_S \sqrt{2\pi}} \frac{P_S}{P_B} \right) = 0 \quad (4.21)$$

donde N corresponde a la función 1D-LRT para una PDF_B gaussiana, Ln para una log-normal, Γ = gamma y E = exponencial negativa. Las expresiones P_S y P_B son las probabilidades de selección a priori de las distribuciones de chorro y fondo a derecha e izquierda de T_{ap} , respectivamente.

Un análisis comparativo entre los resultados del procesado de imágenes ya sea que el umbral de selección se determine como el valor de T_{ap} o T se

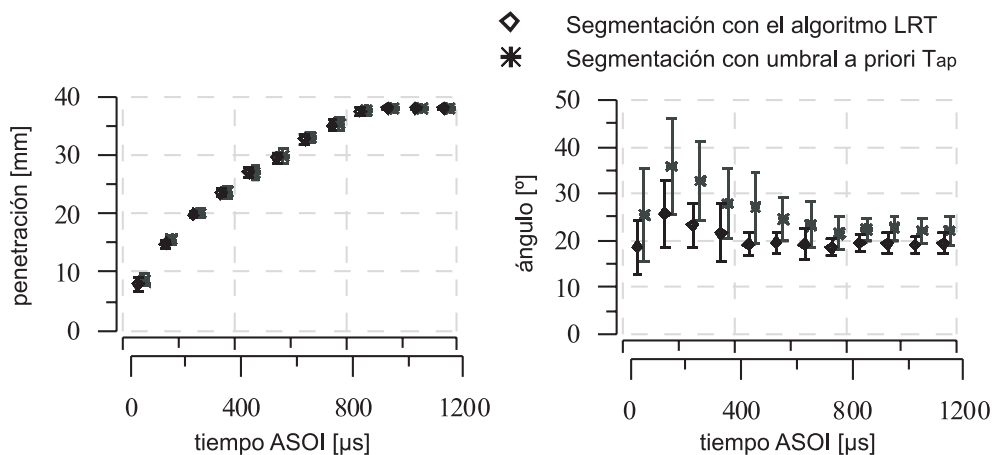


Figura 4.14: Comparación entre la penetración y ángulo promedio de las medidas en contornos calculados con umbral a priori T_{ap} y umbral T óptimo con 1D-LRT. Se han desfasado los valores de tiempo para la mejor presentación de los resultados.

presenta en la figura 4.14, para las imágenes correspondientes a la secuencia de la figura 4.13. En la representación temporal se han desfasado los valores de escala de la abscisa de la gráfica para una mejor presentación de las medidas. Además solo se presentan los resultados hasta 1200 μs ASOI, ya que por encima de este valor, el chorro ha alcanzado los límites de la ventana del acceso óptico.

Aunque en la gráfica se observa que los resultados de penetración son bastante similares para los dos casos, no sucede lo mismo para la medida de ángulo. Los valores medios de la medida del ángulo por instante de tiempo presenta una tendencia similar aunque con una aparente sobrestimación para chorros segmentados con T_{ap} y una mayor dispersión manifestada en las barras de error. De la misma manera, se observa como el ángulo calculado con T alcanza antes el valor estable, unos 300 μs antes del calculado con T_{ap} . Estos datos ponen de manifiesto que los resultados de la segmentación a priori dependen demasiado del valor empírico k de la ecuación 4.16. La razón es que una vez fijado k , el umbral a priori T_{ap} se obtiene únicamente a partir de la PDF_B sin tener en cuenta la distribución correspondiente al chorro y, por tanto, sin considerar los errores en la estimación asociados a la superposición de las clases.

En la gráfica de valores medios de ángulo, se observa como el valor calculado del contorno, muestra una gran dispersión antes de alcanzar el ángulo estable en ambos casos. Esta variabilidad en las medidas, representada por las barras de error de los resultados de las imágenes con poca penetración,

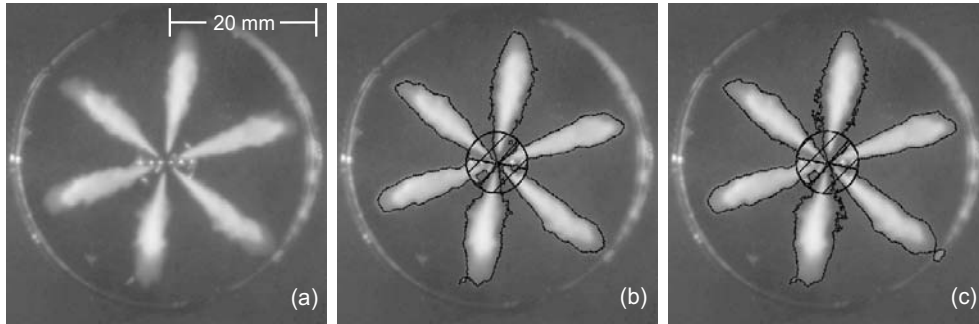


Figura 4.15: (a) Imagen de 6 chorros correspondiente a una de las repeticiones del tiempo de $150 \mu s$ ASOI. Se superponen los contornos de la segmentación con umbral óptimo T (b) y T_{ap} (c).

se puede deber a la pobre resolución espacial traducida en un número menor de píxeles en el contorno. Los chorros cortos están ubicados en un área muy pequeña comparada con la del fondo, máxime teniendo en cuenta que la zona del inyector no se suele incluir en el análisis por la presencia de reflejos que falsearían los resultados.

En la figura 4.15(a), se presenta una imagen correspondiente al tiempo de $150 \mu s$ ASOI donde se observa la máxima desviación estándar en la gráfica de ángulo de la figura 4.14. Las dos imágenes que la acompañan corresponden a los contornos superpuestos obtenidos de la segmentación con T y T_{ap} . Se debe matizar que el círculo exterior que se observa en las imágenes no es el límite del campo de visión, sino los reflejos en el bisel del soporte del inyector. Nótese como el contorno obtenido con T_{ap} , figura 4.15(c), tiende a seguir, en los chorros superior e inferior, la forma del sector como ya se observaba en la figura 4.12(a). Las diferencias entre las medidas de ángulo entre chorros pueden alcanzar hasta 10° siendo inferior para el caso del contorno obtenido de la segmentación con LRT.

Para chorros más desarrollados, las diferencias entre los valores medios de la medida del ángulo se hace significativamente más pequeña con valores entre 3° y 5° . En este nivel de desarrollo las diferencias de los contornos entre chorros son igualmente pequeñas. En muchos casos la superposición de contornos puede mostrar una sobrestimación de 1 o 2 píxeles, lo que pone de manifiesto la sensibilidad de la medida del ángulo a pequeñas variaciones en el contorno.

4.3.2.5. Imágenes con información del color

Existe una gran variedad de algoritmos utilizados en el análisis de imágenes de color los cuales suelen tener un alto coste computacional. No obstante, esta información suele ser especialmente importante en algunas aplicaciones como es la visualización de la radiación térmica del hollín, lo que justifica su implementación. En el estudio de chorros Diesel, el color ha sido utilizado para aumentar la dimensionalidad de los sistemas de selección como lo expresan Payri *et al.* [18] quienes determinan la existencia de una dirección privilegiada en el espacio RGB sobre los que tienden a distribuirse los niveles digitales del chorro y de fondo.

En el presente trabajo la información del color fue empleada para aumentar la población de muestreo y con ello la probabilidad de éxito en la obtención y cálculo de la función de densidad de probabilidad que caracterice apropiadamente la dispersión de luz por las clases chorro-fondo. Las imágenes que han servido de ejemplo en el presente capítulo, cuentan con las tres matrices RGB de las cuales es posible obtener un histograma por matriz y sector de imagen. Para cada histograma se evalúan las diferentes funciones de probabilidad. El umbral óptimo de segmentación se calcula con la función que mejor se ajuste a un determinado histograma. Esto es, que para cada sector de imagen se calcula un único umbral correspondiente a la matriz de color al cual corresponde el histograma mejor modelado.

Los resultados de la estimación estadística en el análisis completo de los diferentes casos que se vienen trabajando en el presente apartado, se han registrado en la tabla 4.3. La estimación se lleva a cabo para cada sector de matriz de color, esto significa que para los dos primeros casos, 140 imágenes de 6 chorros por imagen y tres matrices de color, el algoritmo realizará más de 2500 ejecuciones.

Un análisis de los resultados muestran como la función que mejor se ajusta a los histogramas es la función PDF_{Γ} , debido a la tendencia antes mencionada de la no asimetría de la distribución de fondo. No obstante, siguen existiendo casos mejor caracterizados por las otras funciones. En cuando a las matrices de color más apropiadas, no se observa una tendencia clara en los resultados de la tabla. En los casos de la maqueta de nitrógeno, se observa un leve máximo para la matriz azul, mientras que en el caso donde se visualiza en condiciones reactivas, la matriz mejor caracterizada es la roja sin llegar al 50 % del total de chorros analizados. Queda entonces clara la importancia de utilizar las tres matrices de color en el análisis automático de las imágenes, cuando se disponga de ellas.

4.3.3. Post-procesado

El resultado de la segmentación es una imagen binaria con la posición espacial de los píxeles que el algoritmo de procesado ha considerado como de la clase chorro, incluido el ruido binario⁹. Con la aplicación de algoritmos especiales se puede eliminar el ruido binario y calcular el contorno de los chorros sobre los que se realizan las medidas. Los contornos calculados podrán ser evaluados a posteriori en casos especialmente dudosos. No obstante, el análisis estadístico de resultados permite identificar posibles fuentes de error.

⁹El ruido binario son todos los píxeles erróneamente clasificados debido a la superposición de las distribuciones, y que pueden aparecer en la imagen binaria al aplicar el algoritmo de segmentación.

Tabla 4.3: Resultados de la estimación estadística para los diferentes casos característicos.

Caso (a). 140 imágenes en maq. N ₂ Tobera de 6 orificios Apertura $f/5,6$				Caso (b). 140 imágenes en maq. N ₂ Tobera de 6 orificios Apertura $f/8$			
PDF _B óptimo	chorros [%]	matriz óptima	chorros [%]	PDF _B óptimo	chorros [%]	matriz óptima	chorros [%]
N	14	R	18	N	21	R	18
Ln	11	G	36	Ln	2	G	32
Γ	73	B	46	Γ	75	B	50
E	2			E	2		
Caso (c). 130 imágenes en maq. N ₂ Tobera de 5 orificios Apertura $f/5,6$				Caso (d). 55 imágenes en motor Tobera de 6 orificios			
PDF _B óptimo	chorros [%]	matriz óptima	chorros [%]	PDF _B óptimo	chorros [%]	matriz óptima	chorros [%]
N	—	R	3	N	7	R	45
Ln	—	G	36	Ln	16	G	25
Γ	—	B	61	Γ	77	B	30
E	100			E	—		

N = gaussiana, Ln = log-normal, Γ = gamma y E = exponencial negativa
 R = matriz roja, G = matriz verde y B = matriz azul.

4.3.3.1. Eliminación de ruido y determinación del contorno

El ruido binario suele aparecer cuando se aplican algoritmos de segmentación que no tienen en cuenta las propiedades espaciales de las clases (el algoritmo planteado tiene en cuenta únicamente las propiedades estadísticas de las distribuciones de niveles digitales). Este ruido es aleatorio y varía en función de las características particulares de las imágenes. Normalmente aparece disperso y separado de la región ocupada por el chorro, lo que permite eliminarlo fácilmente utilizando métodos basados en técnicas de morfología matemática y en el concepto de conectividad entre píxeles [4, 19]. Las relaciones de conectividad indican si dos píxeles pertenecen al mismo objeto (están conectados) o pertenecen a objetos distintos (están desconectados). La relación utilizada ha sido la 8-conectividad: un píxel está 8-conectado con los píxeles situados a su alrededor con igual nivel digital (0 ó 1).

Para eliminar el ruido binario de las imágenes de chorros Diesel se determina un punto, en la imagen binaria, que pertenece al chorro con coordenadas (x_0, y_0) . Este es un punto a cierta distancia del orificio de la tobera en el eje del chorro. A partir de este punto se determinan los píxeles que están 8-conectados al píxel (x_0, y_0) y se eliminan los que no lo están.

La determinación del contorno se lleva a cabo sobre la imagen binaria segmentada con el LRT y libre de ruido binario. Con esta imagen resulta relativamente sencillo determinar el contorno ya que solamente es necesario detectar aquellos píxeles de la imagen que presenten algún salto de nivel ($0 \rightarrow 1$ ó $1 \rightarrow 0$) con alguno de los ocho píxeles situados a su alrededor. Este procedimiento no sería efectivo si previamente no se hubiera eliminado el ruido binario de la imagen ya que se detectarían como si fueran del contorno puntos que no lo son, lo que finalmente daría lugar a errores en la estimación de los parámetros característicos del chorro Diesel.

La imagen del contorno proporciona la relación espacial de cada punto de la frontera entre el chorro y el fondo, presentados en un plano perpendicular al eje óptico de visualización. Estos puntos serán empleados para la caracterización macroscópica mediante el cálculo de la geometría del chorro como la penetración, el ángulo del chorro, el volumen, etc. Para que esto pueda ser posible se deben realizar varias correcciones de perspectiva y la conversión de los puntos del contorno a unidades de longitud.

Tanto las correcciones de perspectiva como la conversión a unidades métricas de longitud se llevan a cabo mediante el cálculo de las coordenadas de los puntos del contorno, referenciado cada uno de ellos al orificio del inyector como se aprecia en la figura 4.16. Para ello, se debe tener un conocimiento previo

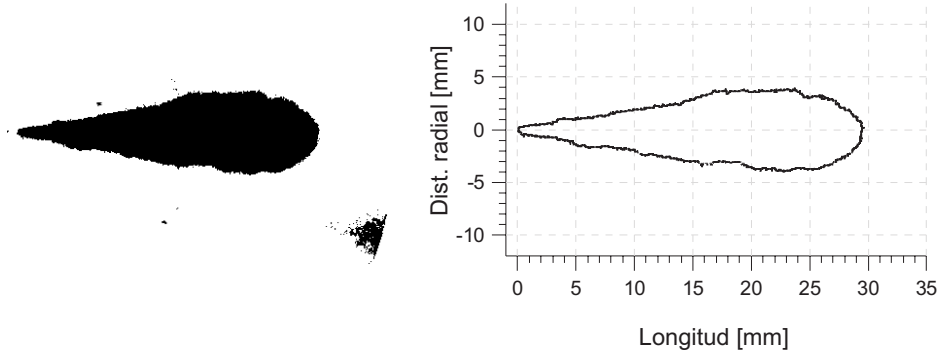


Figura 4.16: Imagen binaria con ruido resultado de la segmentación. Eliminado el ruido binario con un algoritmo de 8-conectividad, es posible determinar el contorno del chorro y cuantificar la posición relativa de los píxeles en unidades de longitud.

del ángulo entre chorros conocido como ángulo de cono. Este valor está referenciado al ángulo formado entre el eje de los orificios y el plano del soporte del inyector, β en la figura 4.17. La posición real de un punto del contorno p_i será la proyección p_f en el plano perpendicular. Igualmente, se debe conocer la distancia entre la salida del orificio y el centro del inyector, ya que no siempre es posible detectar correctamente el origen de todos los chorros mediante visualización por los reflejos en las toberas.

La información del ángulo entre chorros y la distancia entre el orificio y el centro de la tobera, suelen ser datos proporcionados por los fabricantes.

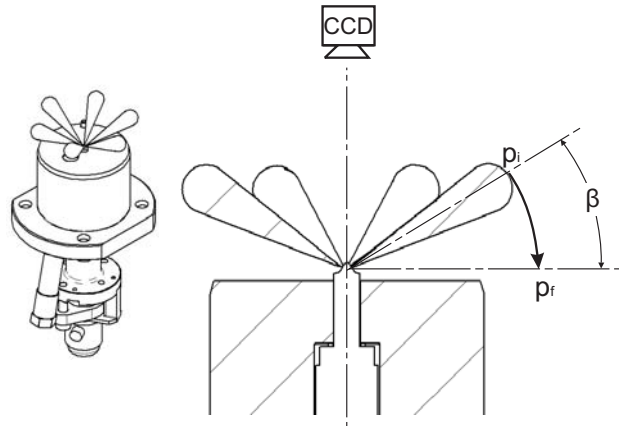


Figura 4.17: Proyección de los puntos del chorro en el plano del soporte del inyector. El eje del chorro se encuentra β grados del plano perpendicular al eje óptico.

No obstante, si no se dispone de ellos se puede recurrir a la adquisición de imágenes con diferente perspectiva que garanticen la medida. Visualizando frontalmente con buena nitidez y contraste, para la distancia orificio-centro, y perpendicularmente a un plano que formen dos chorros enfrentados, para la medida del ángulo β .

Posteriormente, con la resolución espacial de la imagen (relación píxel/mm) se realiza la conversión de las coordenadas de los píxeles a las unidades métricas de longitud. En la figura 4.16 se presenta la imagen binaria con ruido, producto de la segmentación de un sector de una imagen de chorro Diesel para una tobera con $\beta = 17^\circ$. Con la cuantificación y las correcciones de perspectiva se logra graficar cada uno de los puntos del contorno sobre los cuales se realizará la caracterización geométrica.

4.3.3.2. Post-procesado para la validación subjetiva de la calidad de la segmentación

La validación de la segmentación se suele regir por medio de procesos subjetivos en los cuales el usuario es quien determina si el contorno detectado es realmente el mejor o si por el contrario no es aceptable. Ya que la decisión se toma de acuerdo con el criterio de cada usuario, para facilitar esta decisión y hacer que sea lo más objetiva posible, se han implementado herramientas gráficas de superposición automática del contorno a imágenes con contraste mejorado o pseudocoloreado. El proceso de validación no es una tarea obligada ni repetitiva, ésta solo suele ser realizada en casos con resultados especialmente dudosos.

Para la mejora del contraste y la pseudocoloración, se deben tener dos consideraciones principales:

- El rango dinámico y espectral de las imágenes originales: estas suelen tener un mayor rango de niveles digitales que el admitido por los sistemas gráficos de impresión, por lo que se deben implementar funciones de compresión irreversibles mediante conversión matemática y asignación de valores combinados de falso color.
- Los sistemas gráficos convencionales (impresoras, monitores y otros periféricos) solo admiten un máximo 256 niveles digitales, ampliables con el uso de tarjetas de color. Esto significa que una imagen en escala de grises que se muestra por monitor o se imprime, solo posee 256 de nivel de gris. En el caso del color, este se construye por medio de la combinación de

colores primarios: en el espacio RGB existen 256 niveles diferentes para cada color [5].

Mejora del contraste

En la aplicación de algoritmos de compresión se busca optimizar el rango dinámico efectivo de las imágenes mediante conversiones matemáticas de los niveles digitales. Las funciones, definidas como LUT ('Look-up table'), que suelen ser de tipo lineal o logarítmica, definen niveles máximos y mínimos de optimización del histograma de la imagen. En otras palabras a los píxeles de la imagen original con valores de nivel digital por debajo del nivel mínimo se les asigna un valor de 0 en la imagen de salida y los valores por encima del máximo (que puede ser el nivel de saturación **SL** de la cámara) tomarán valores de saturación de 255 (en escala de 0-255 niveles). Los niveles intermedios siguen una recta entre el mínimo y el máximo como se aprecia en la ecuación 4.22.

$$f'(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 < f(x, y) < \min \\ \frac{256 \times [f(x, y) - \min]}{(\max - \min)} & \text{si } \min < f(x, y) < \max \\ 256 & \text{si } \max < f(x, y) < SL \end{cases} \quad (4.22)$$

En el caso del LUT logarítmico, estos siguen curvas definidas por ecuaciones matemáticas como la ecuación 4.23:

$$f'(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{si } 0 < f(x, y) < \min \\ SL^{(1-\gamma)} f(x, y)^\gamma & \text{si } \min < f(x, y) < \max \\ 256 & \text{si } \max < f(x, y) < SL \end{cases} \quad (4.23)$$

donde **SL** es el nivel de saturación de la imagen original normalizado a 256 niveles y γ un valor definido por usuario ($0 < \gamma < 1$). El valor de nivel digital final para el píxel $f'(x, y)$ será función del valor inicial de la imagen en formato original 'raw' $f(x, y)$ [8].

Pseudocoloración

La pseudocoloración es una herramienta que se suele utilizar para minimizar las pérdidas por compresión de una imagen con amplio rango dinámico a

los 256 niveles admitidos por los sistemas gráficos convencionales. Otra aplicación igualmente importante del falso color consiste en asignar valores visibles a imágenes que visualizan radiaciones fuera del rango espectral visible como imágenes termográficas o las de quimioluminiscencia de OH* que se tratarán en el capítulo 6.

Éstos algoritmos aprovechan la forma como los sistemas gráficos digitales llevan a cabo la interpretación del color. Retomando la ecuación 4.2 de construcción del espacio RGB, se puede obtener una imagen de salida en falso color a partir de una imagen en escala de niveles de intensidad en formato 'raw'. La ecuación 4.24 resume el algoritmo empleado en el presente trabajo para la pseudocoloración de las imágenes que aquí se exponen. Este algoritmo divide el rango dinámico original en secciones con igual número de niveles y aplica diferentes funciones a la reconstrucción de los componentes vectoriales del espacio de color [$\vec{r}'(x, y)$, $\vec{g}'(x, y)$ y $\vec{b}'(x, y)$]. La conversión se consigue aplicando un LUT lineal a cada sector del rango dinámico de la imagen original como se puede apreciar en la composición de los componentes vectoriales de la ecuación 4.24. Si se imprime una nueva imagen $\vec{f}'(x, y)$ en el espacio RGB el rango dinámico se ampliará a 5×256 .

$$\vec{f}'(x, y) = \vec{r}'(x, y) + \vec{g}'(x, y) + \vec{b}'(x, y) \quad (4.24)$$

$\vec{r}'(x, y)$	$\vec{g}'(x, y)$	$\vec{b}'(x, y)$	\forall
0	0	$\frac{5 \cdot 255 f(x, y)}{SL}$	$0 \leq f(x, y) \leq \frac{1}{5} SL$
0	$\frac{5 \cdot 255 f(x, y)}{SL} - 255$	255	$\frac{1}{5} SL < f(x, y) \leq \frac{2}{5} SL$
$\frac{5 \cdot 255 f(x, y)}{SL} - 2 \cdot 255$	255	$3 \cdot 255 - \frac{5 \cdot 255 f(x, y)}{SL}$	$\frac{2}{5} SL < f(x, y) \leq \frac{3}{5} SL$
255	$4 \cdot 255 - \frac{5 \cdot 255 f(x, y)}{SL}$	0	$\frac{3}{5} SL < f(x, y) \leq \frac{4}{5} SL$
$5 \cdot 255 - \frac{5 \cdot 255 f(x, y)}{SL}$	0	0	$\frac{4}{5} SL < f(x, y) \leq SL$

$SL = \text{nivel de saturación}$

Las imágenes en color real interpretadas con paletas de color RGB, cuentan con más de 16 millones de combinaciones posibles (256 por cada componente RGB). No obstante, este método de interpretación está optimizado para simular la forma como el sistema de visión humano interpreta el espectro visible. Esto significa, que una imagen en color es el registro de la intensidad lumínica para las tres longitudes de onda correspondientes a los colores rojo, verde y azul. En imágenes de chorro líquido iluminadas con una luz blanca, no existirán diferencias importantes entre una imagen impresa en escala de grises o impresa en color real.

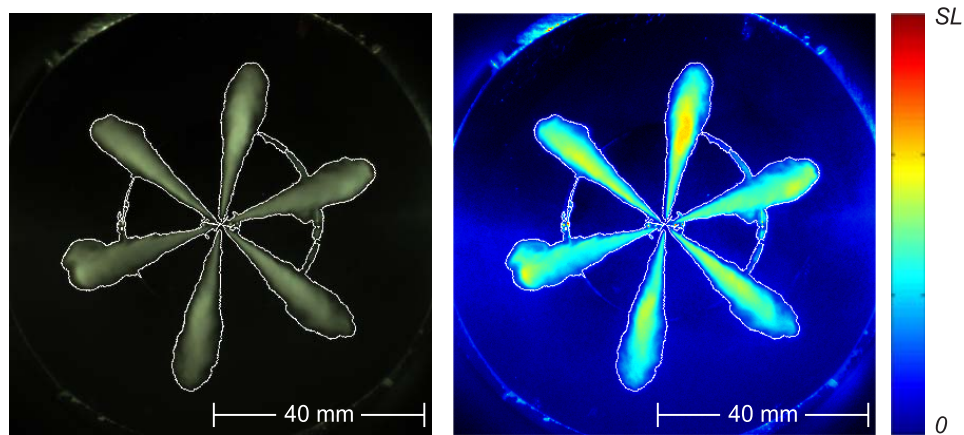


Figura 4.18: Imagen de chorro, en color real y falso color, registrada con una cámara con CFA. Utilizando el falso color se facilita la visualización de detalles. Se superponen los contornos producto de la segmentación de la imagen original.

Las imágenes de la figura 4.18 son un ejemplo de una imagen en color real producto de la visualización con una cámara con arreglo de filtros de color. Esta misma imagen en falso color permitirá observar detalles que de otra manera serían difíciles de detectar como por ejemplo la no homogeneidad del fondo. Con la superposición de contornos se observa como éstos siguen correctamente una buena parte de la frontera del chorro. No obstante, en las zonas con brillo la segmentación falla y se hace necesario el diseño de una máscara apropiada para que la información de los píxeles en esta zona no afecte los resultados (ver § 4.3.1).

4.3.3.3. Caracterización geométrica del chorro

La caracterización macroscópica del chorro se realiza mediante la implementación de algoritmos para la determinación de la geometría del contorno obtenido con la segmentación. Las características medidas son el ángulo del chorro, la penetración y el volumen ocupado por el chorro dentro de la cámara de inyección. La base de estos algoritmos se encuentra en el trabajo de Palomares [1] y se describen continuación:

- El ángulo de apertura del chorro se estima como el ángulo formado por dos rectas de regresión realizando un ajuste por mínimos cuadrados del 60% de los puntos (superior e inferior) del contorno más cercanos al

orificio, como puede apreciarse en la figura 4.19. Se evaluaron otros porcentajes en el rango de 45 % a 70 % que es el valor máximo donde se estima que el chorro se encuentra en fase estacionaria [20–22]. Las medidas de ángulo α mediante el ajuste lineal para los diferentes porcentajes mostraron resultados bastante repetitivos entre el 45 % y el 60 %.

- El eje del chorro se define como la bisectriz de las rectas de regresión ajustadas a la parte superior e inferior del contorno.
- La estimación de la penetración se realiza como el valor medio de los puntos del contorno en una zona próxima al frente del chorro y alrededor del eje corregido. La selección de una población de puntos tiene como finalidad evitar medidas incorrectas en el caso de chorros con geometrías atípicas. En particular se han tomado los puntos del contorno siguiendo el criterio de Palomares quien determina la penetración con los puntos finales al 20 % del contorno en la zona transitoria del chorro, y 1 mm por encima y por debajo de la bisectriz. La distancia media entre los puntos en esta zona de control y el orificio de la tobera, será la penetración final del chorro.
- El cálculo del volumen se consigue bajo la hipótesis de axisimetría del chorro visualizado, como la suma del volumen de finos discos de espesor e_i y de radio r_i que es el valor medio de la distancia del eje corregido al punto del contorno tanto superior como inferior.

$$V = \sum_{i=1}^n \pi r_i^2 e_i$$

con n igual al total de puntos del contorno.

Como aportación a estos algoritmos de medida, se ha modificado el criterio para la definición del ángulo del chorro. En trabajos previos, éste se definía como el ángulo formado por dos rectas de regresión realizando un ajuste por mínimos cuadrados a los primeros puntos del contorno, pero forzando que la regresión pasara por el origen (orificio del inyector). Este planteamiento presenta errores de estimación importantes ya que en una gran parte de las aplicaciones las toberas de inyección presentan reflejos por lo que fue necesario el uso de una máscara definida en la pre-segmentación (ver § 4.3.1).

Por otro lado, como se muestra en la figura 4.20, se ha constatado que hacer pasar las líneas por el origen induce a errores de estimación importantes aunque se consiguiera detectar el chorro sobre la tobera. Este fenómeno fue

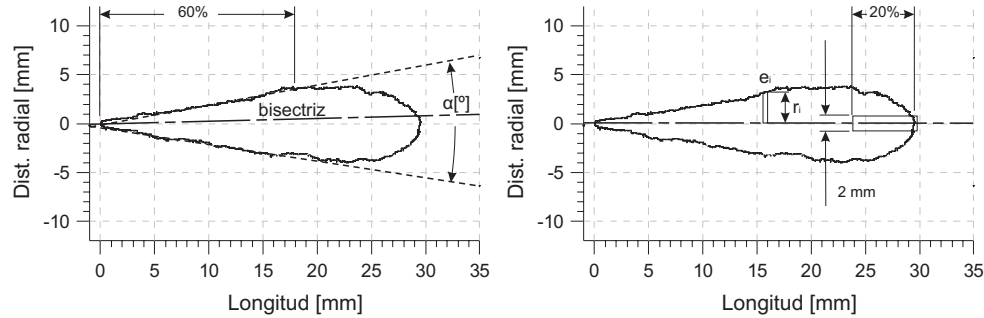


Figura 4.19: Algoritmos para la estimación de los parámetros geométricos macroscópicos del chorro Diesel a partir de su contorno.

mucho más fácil de identificar en chorros inyectados en condiciones reactivas donde la tobera es poco o nada reflejante debido a la deposición de hollín que actúa como cuerpo negro absorbiendo la radiación externa y proporcionando mejor contraste chorro-fondo (tobera en este caso). Los contornos de la figura corresponden a imágenes de chorro líquido adquiridas en la instalación del motor maqueta en condiciones reactivas. En la figura se puede observar como la forma del contorno afecta incluso al cálculo del ángulo del chorro en función del tipo de ecuación de ajuste lineal utilizada en la definición de las rectas de regresión.

En imágenes de chorros líquidos registradas en instalaciones no reactivas, la presencia de hollín es nula y por lo tanto las toberas reflejarán una importante cantidad de radiación que evita la correcta identificación del chorro en las proximidades del orificio.

4.3.3.4. Tratamiento estadístico de datos

Uno de los objetivos de los estudios de visualización, es el análisis del desarrollo temporal del chorro en términos de penetración, ángulo, volumen... Igualmente, en todos los casos interesa tener un número representativo de imágenes por instante de tiempo que muestre la repetitividad del proceso tanto de inyección como de visualización. Como ya se ha mencionado previamente, con los sistemas CCD el registro de imágenes se lleva a cabo mediante una adquisición por inyección en contra de lo que sucede con los sistemas CMOS (varias imágenes para un mismo evento de inyección).

Para ayudar a la interpretación de datos de un número tan alto de imágenes e identificar posibles fallos en la adquisición o el procesado, se debe proceder a realizar un análisis estadístico de los resultados medidos sobre cada contorno

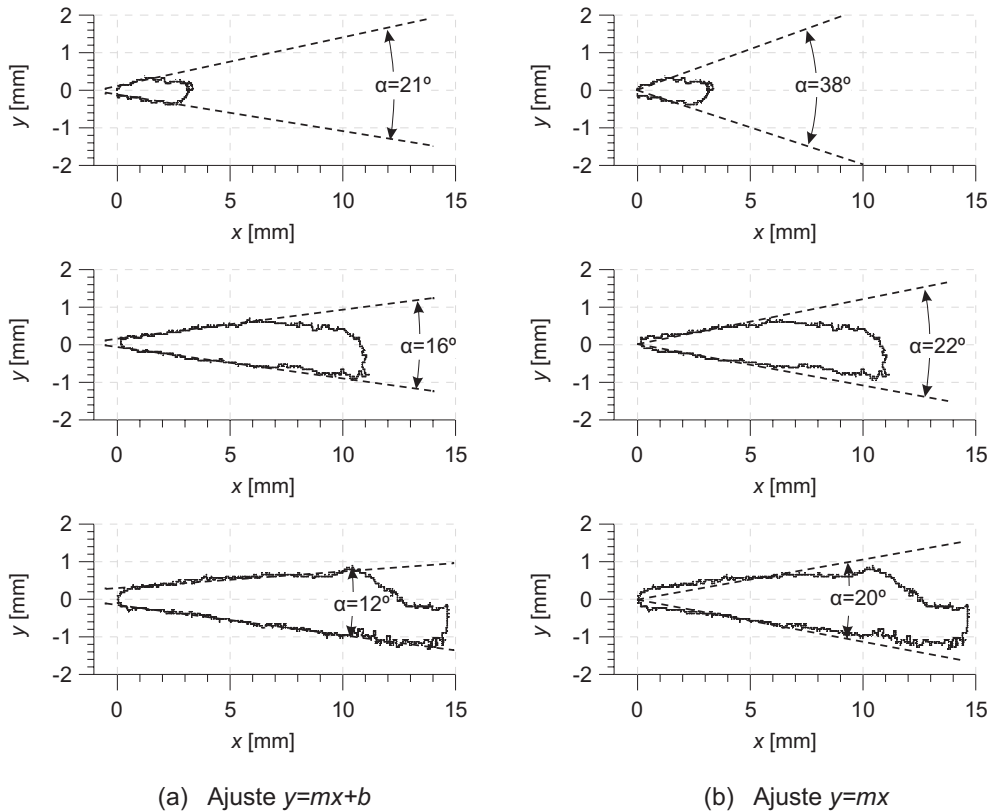


Figura 4.20: Líneas de regresión ajustadas al 60% de los puntos de contornos de chorros Diesel con diferentes penetraciones (a) con origen fuera del orificio de la tobera, (b) con origen en el orificio de salida.

de cada chorro segmentado. La forma tradicional de representar y resumir estos resultados es mediante el cálculo del valor medio entre las diferentes repeticiones correspondientes a un mismo tiempo como se puede apreciar en la figura 4.21. En la gráfica se muestran los resultados medios de penetración y ángulo de imágenes de chorros Diesel inyectando en la maqueta isoterma, para una tobera de cinco orificios tomando cinco imágenes por instante de tiempo ASOI. Para simplificar la gráfica, se presentan los resultados de media y desviación de los tres primeros chorro, aunque la gráfica inferior corresponde a la desviación media calculada de los cinco chorros de la tobera.

Los valores medios se muestran con las barras de error que representan la desviación típica entre repeticiones sobre resultados filtrados¹⁰. No obstante,

¹⁰El filtrado de resultados es una subrutina que identifica valores incoherentes (nulos,

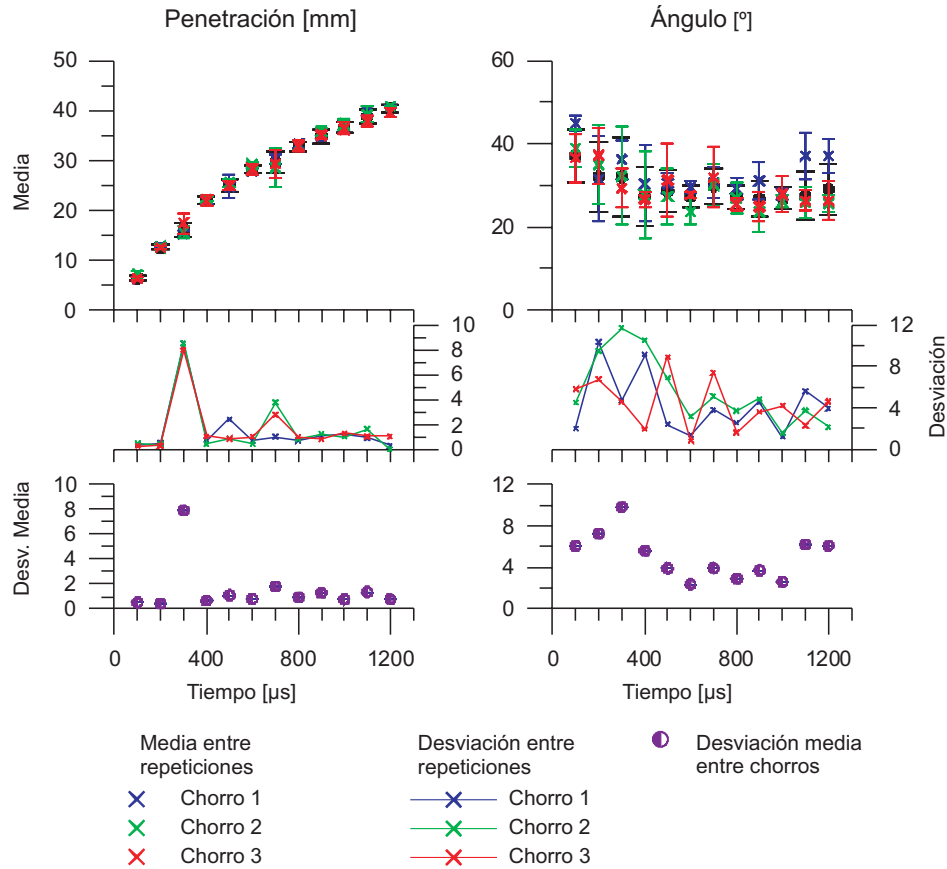


Figura 4.21: Medidas del valor medio y desviación, de cinco repeticiones, de la penetración y ángulo de tres chorros de una tobera de cinco orificios (gráficas superior y media), y desviación media de los 5 chorros (gráfica inferior).

la gráfica central corresponde a la desviación no filtrada de cada chorro de la medida de las 5 repeticiones, indicando la no repetitividad del muestreo. Adicionalmente, en la parte inferior se grafica la desviación media entre los diferentes chorros de la tobera, indicando la dispersión existente entre chorros debida a las diferencias de ángulo de cono, diferencias de la geometría interna de los orificios, la geometría del asiento de la aguja, etc [23].

Un punto común observado en las desviaciones, especialmente llamativo en las gráficas de penetración, corresponde a las imágenes del tiempo de 300 μs . Esta marcada irregularidad, se debe a errores en el procesado de chorros cu-

negativos...) producto de un fallo en el procesado y los elimina de los ficheros de datos.

Los frentes se superponen a los reflejos del bisel del soporte observado en las imágenes adquiridas en la maqueta de N_2 (ver imágenes, de tiempos posteriores, de las figuras 4.3 a 4.5). Se debe recordar que para este tipo de imágenes se construye una máscara con la geometría del bisel, cuyos píxeles no son tenidos en cuenta en la segmentación. Para otros tiempos la medida de desviación es un indicador de la dispersión ciclo a ciclo de la inyección.

El cálculo de todos estos parámetros estadísticos, se lleva a cabo automáticamente para todos los chorros de la tobera. Los ficheros de salida integran así todo el análisis de una secuencia completa, tanto instantáneamente como en todo el tiempo de desarrollo.

4.4. Análisis de la robustez de los algoritmos

Los algoritmos de procesamiento digital de imágenes (PDI) suelen ser desarrollados para determinadas aplicaciones con características particulares. Si el problema se sale de los límites característicos con que son diseñados, el análisis puede fallar o los resultados no ser fiables. Para determinar el alcance de los algoritmos de PDI del presente capítulo, se eligieron diferentes imágenes características de un ensayo típico. Las características de las imágenes presentan una gran variabilidad según la configuración experimental y las condiciones en las cuales se lleva a cabo la visualización. Concretamente se estudia la incidencia, sobre el resultado del procesado, de la posición de las fuentes de iluminación a partir de las imágenes presentadas en el apartado 4.2 y la configuración de la apertura del diafragma del objetivo fotográfico de imágenes de 6 chorros utilizadas en el planteamiento de las hipótesis para el desarrollo de los algoritmos de segmentación. Otros factores que varían las propiedades de las imágenes son la accesibilidad óptica de las diferentes instalaciones donde se visualiza y las variaciones en las características de los sistemas de inyección estudiados como es el número de orificios de una tobera.

4.4.1. Configuración de la iluminación

Al inicio del capítulo se definieron las configuraciones para la visualización de chorros Diesel en instalaciones experimentales provistas con tres accesos ópticos o en instalaciones con acceso único (ver § 4.2) quedando clara la importancia de una correcta iluminación. En instalaciones con acceso único, este proceso de iluminación es bastante más complejo y no suelen presentarse muchas posibilidades de posicionamiento de las fibras ópticas. Por el contrario, en las instalaciones donde la visualización y la iluminación se pueden realizar

por diferentes ventanas, el abanico de posibilidades en la configuración es más amplio.

Para estudiar el efecto de la posición de las fibras ópticas en la calidad de las imágenes, se registraron diferentes secuencias de imágenes en la maqueta de N_2 conservando constantes las condiciones de ensayo. De esta forma, se realizó un análisis de las características visuales de las imágenes según varían la posición relativa entre las fuentes de iluminación y los chorros. De las secuencias de imágenes, se seleccionaron algunos ejemplos que corresponden a chorros desarrollados representativos de cada posición de las fibras como se muestra en la figura 4.2. Como resultado del análisis se consideraron buenas las posiciones 3, 5, 9 y 10, donde parecen mejor iluminados los chorros para estas condiciones particulares (ver figuras 4.4 y 4.5). Los resultados variarán entre sistemas de inyección por la configuración de las toberas (número de chorros, ángulo de cono entre chorros, etc.) y la posición de la tobera en el interior en la cámara de inyección.

En el presente apartado se evalúa el efecto que tiene en los resultados de penetración y ángulo, la posición de las fibras ópticas. Para este análisis se procesaron, con el algoritmo 1D-LRT propuesto en el trabajo (caracterizada la distribución de fondo con la PDF que mejor se ajusta a cada histograma), las secuencias completas de los puntos del inicio del capítulo. Los resultados se presentan en las figuras 4.22 y 4.23, para las medidas de penetración y ángulo, respectivamente.

Los resultados corresponden a valores medios de los 5 chorros de la tobera y 5 repeticiones por instante de tiempo ASOI. Para una visualización más cómoda, las medidas se presentan divididas en cuatro gráficas por figura, según el ángulo de posición de las fibras. Para las dos primeras gráficas, la iluminación se logró posicionando las fibras perpendiculares a las ventanas de visualización: en la primera sobre el eje central de los accesos y la segunda para los dos extremos superior e inferior. Las gráficas inferiores corresponden a las posiciones con ángulos $\delta = 30^\circ$ y 45° (ver figura 4.2). En todas las gráficas se muestran los resultados del punto 3 que es usado como punto de referencia.

Las medidas de penetración para las posiciones 1 a 6 muestran valores bastante repetitivos entre puntos. Solo al final del punto 2 se observa una ligera subestimación de aproximadamente un milímetro, presentada en la sección superpuesta a la primera gráfica. Este aumento corresponde a la subestimación de uno de los chorros cuyo frente no parece bien iluminado cuando se aproxima a la pared de la instalación. En cuanto a las medidas de ángulo, las diferencias son más importantes, especialmente para los puntos 1 y 2, confirmando la observación que se hacía de la figura 4.4 para estos mismos puntos. Para otros

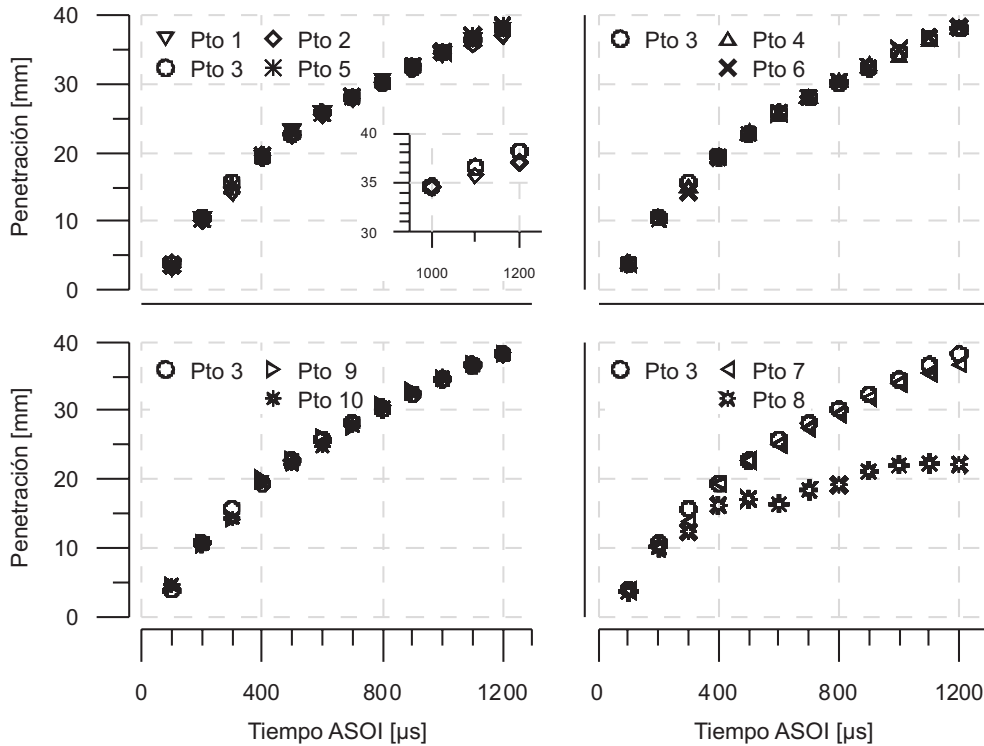


Figura 4.22: Resultados de penetración de chorro para diferentes configuraciones de iluminación según la posición de las fibras (estudio paramétrico del apartado 4.2).

puntos con $\delta = 0^\circ$, las diferencias son menos significativas como se observa en las gráficas de resultados.

En los puntos donde se observaron mejoras en la apariencia de las imágenes, los resultados no muestran muchos cambios comparados con el punto de referencia 3. Las medidas de penetración para los puntos 9 y 10 son bastante ajustadas y en las medidas de ángulo solo se observa una leve sobrestimación en la sección de ángulo estable para el punto 9. Este mismo comportamiento no se observa en los resultados de las posiciones más acusadas de $\delta = 45^\circ$. De la penetración, se observa una subestimación progresiva para los resultados de penetración del punto 7, mientras para la configuración 8, esta medida apenas logra superar el 50% de la penetración del punto de referencia. Un comportamiento similar se observa para la medida del ángulo en ambos casos.

Estas observaciones coinciden con las realizadas en el análisis subjetivo de las imágenes. Una imagen bien iluminada, será más fácil de procesar, aunque pequeños cambios no deben afectar mucho los resultados de la segmentación.

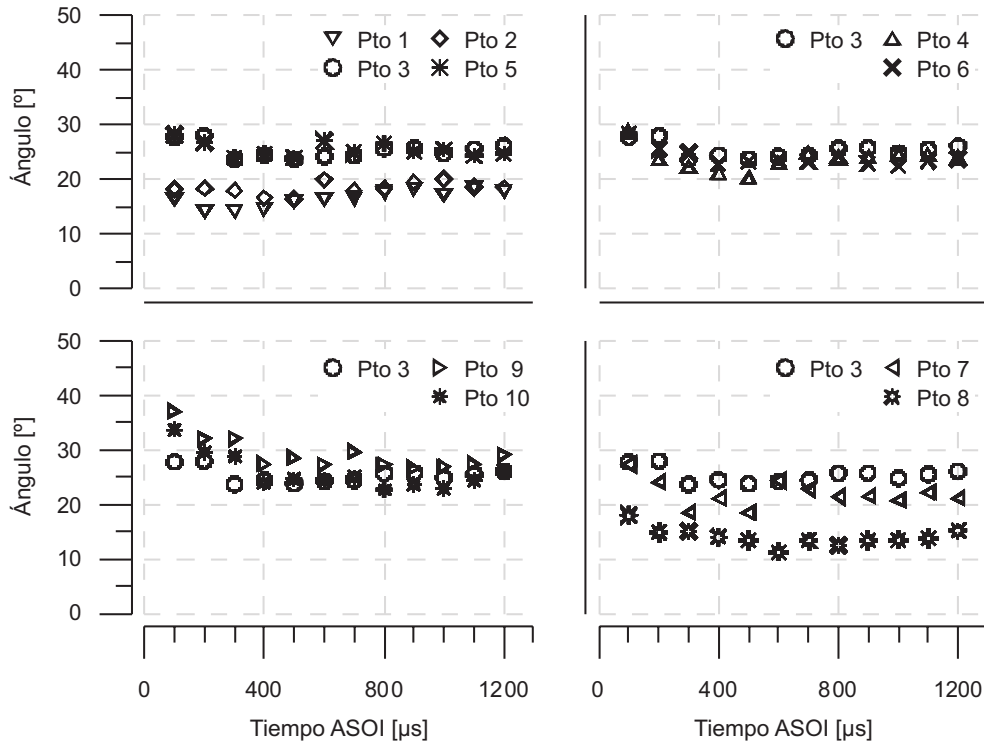


Figura 4.23: Resultados de ángulo de chorro para diferentes configuraciones de iluminación según la posición de las fibras (estudio paramétrico del apartado 4.2).

No obstante, la medida del ángulo presenta mayor sensibilidad a la iluminación que la penetración. Como se viene observando en el desarrollo del trabajo, diferencias de apenas uno o dos píxeles en el contorno de un chorro se pueden traducir en diferencias de aproximadamente 5° en el ángulo medido.

4.4.2. Variación de la apertura del diafragma

El análisis del efecto de la configuración de la apertura del diafragma en los resultados de la segmentación, se llevó a cabo mediante el registro de imágenes de seis orificios en la maqueta de N_2 . Con un ángulo de cono similar al de las toberas de cinco orificios, se ubicaron las fibras en el centro de los accesos, incidiendo perpendicularmente a la cámara de inyección (punto 3 del estudio paramétrico de apartado 4.2). Para el estudio se eligió un objetivo comercial Nikon de 60 mm de focal —para un máximo aprovechamiento de la resolución espacial del sensor de la cámara— y un amplio rango de niveles de

apertura de diafragma¹¹ —entre $f/2,8$ máxima y $f/32$ mínima—. Con éste fue posible controlar ópticamente la luminosidad de las imágenes registradas con la cámara de color CCD PixelFly (ver tabla 3.1). Las condiciones de inyección y posicionamiento de los elementos del montaje se conservaron invariables.

En la figura 4.24 se puede observar la forma de tres histogramas característicos de chorros Diesel para tres diferentes configuraciones de diafragma: $f/5,6$, $f/8$ y $f/11$, que corresponden a valores consecutivos en la escala estándar de números f . Según la definición de esta escala, la configuración $f/11$ solo permite pasar la mitad de la luz que en la configuración $f/8$ y una cuarta parte de la luz que pasaría con la configuración $f/5,6$. En el histograma de la figura para esta última configuración, se puede observar el amplio rango dinámico efectivo (EDR) de la imagen de unos 2600 niveles. A medida que el diámetro efectivo disminuye un paso en la escala estándar, el EDR disminuye aproximadamente la mitad del anterior. Esto es unos 1400 para la configuración $f/8$ y 750 niveles para $f/11$. Un paso de diafragma más abierto ($f/4$) daría, en este caso, un EDR de aproximadamente 5200 niveles, lo que implicaría la saturación del sensor de la cámara cuyo rango dinámico es de 4096 niveles.

En cuanto a la distribución del fondo se observa que el pico característico de la distribución (nivel digital de mayor frecuencia), aumenta significativamente e inversamente con el valor del EDR. En los ejemplos con mayor EDR (configuraciones $f/5,6$ y $f/8$), la distribución presenta, para los niveles más bajos del histograma, la forma de campana característica de los fondos dispersores debido a la presencia de gotas de combustible remanente y reflexiones en las paredes de la instalación (ruido de fondo). Esta señal suele ser bastante débil comparada con la radiación dispersada en las zonas más densas del chorro. Si la configuración de la apertura del objetivo es muy pequeña, la sensibilidad del sistema disminuye y no se detecta apenas ruido. No obstante, la menor sensibilidad del sistema producirá igualmente pérdidas de contraste chorro-fondo por deficiencias en la iluminación.

Al no detectar ruido, los niveles digitales del fondo tienden a presentar valores nulos (negro absoluto) que se traducen en histogramas con forma de ‘J’ inversa, como sucede para la configuración $f/11$. Estas características com-

¹¹La apertura del diafragma determina la cantidad de luz que pasa a través del objetivo. Se especifica como número **F** o $f/\#$ y se define como:

$$f/\# = \frac{f}{\phi}$$

donde f es la distancia focal y ϕ el diámetro efectivo del objetivo. A mayor número **F**, menos luz por unidad de área alcanza el plano del sensor.

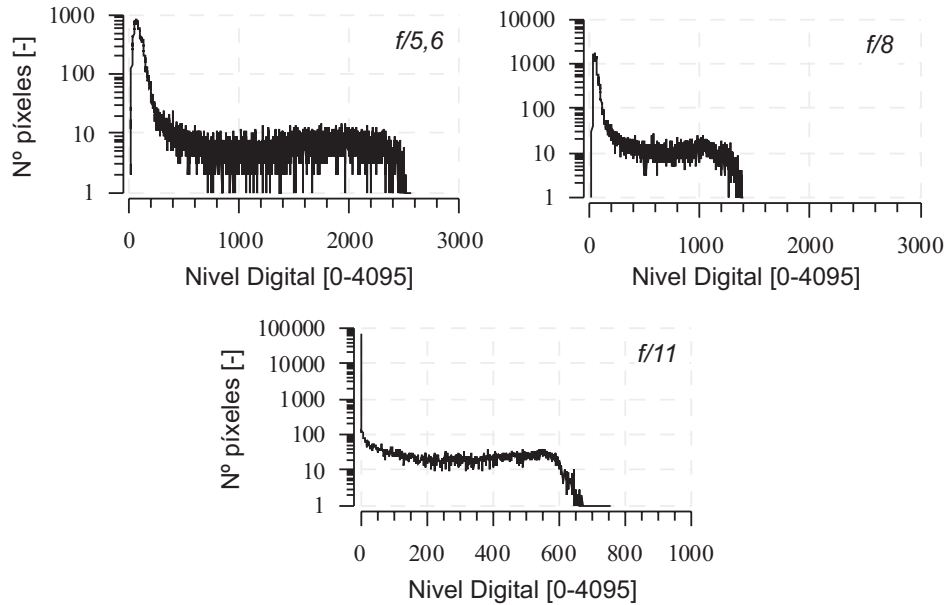


Figura 4.24: Variabilidad, según la configuración de apertura del diafragma, de la forma de los histogramas y del rango dinámico efectivo de las imágenes.

binadas de EDR y forma de los histogramas, ocasionan mayores dificultades a la hora de estimar las funciones de densidad que los modelen. Mediante el procesamiento de tres secuencias completas de imágenes adquiridas con las mismas condiciones de ensayo, pero modificando la configuración de apertura del diafragma, se encontró que las funciones propuestas (normal, log-normal, gamma o exponencial negativa) solo consiguieron modelar apropiadamente un 50 % de los histogramas de los sectores de la configuración $f/11$. Este dato contrasta con el 95 y 93 %, de contornos exitosamente obtenidos para las configuraciones $f/5,6$ y $f/8$ respectivamente. Las secuencias corresponden a 140 imágenes para cada configuración (imágenes de 6 chorros y 5 repeticiones por instante de tiempo ASOI).

Aunque los histogramas con características combinadas de EDR estrecho y fondo poco dispersor, son los que mayores dificultades presentan a la hora de estimar las estadísticas, no se observa lo mismo si estas se presentan independientemente. Es el caso de los histogramas con forma de ‘J’ inversa (figura 4.11 (c)) del punto 3 del estudio paramétrico de § 4.2, que a diferencia del caso evaluado, tiene un amplio EDR. El porcentaje de éxitos, en este caso, fue del 99 %. Por otro lado, los histogramas de imágenes adquiridas en la maqueta reactiva (figura 4.11 (d)), dieron como resultado un 94 % de chorros

procesados. En este último caso, aunque el EDR es muy ajustado, debido a las dificultades de iluminación (instalación con acceso único) y a las pérdidas de intensidad por la presencia del obturador FLC (30 % de transmitancia máxima), los histogramas de las imágenes sí presentan la forma de campana ya que la distribución del fondo se debe principalmente a la dispersión de radiación por productos de la combustión como el hollín. En el primero de los casos el amplio EDR es un indicador de que la iluminación es buena y por lo tanto es de esperar que las pérdidas de información sean mínimas. Por otro lado, las imágenes con fondo predominantemente dispersor, presentan un mayor contraste e histogramas mucho más cómodos de modelar.

Los resultados medios de penetración y ángulo para las tres secuencias de imágenes con diferentes configuraciones de diafragma, se presentan en la figura 4.25. Para la mejor presentación de los resultados, se desfazaron los ejes del tiempo y se eliminaron de la gráfica los valores intermedios a partir de los 400 μs . A partir de este instante se observa una evolución menos variable entre las medidas temporales y diferencias muy pequeñas en los resultados según se varíe la apertura. El proceso de segmentación se llevó a cabo mediante la aplicación del algoritmo 1D-LRT para la PDF que mejor se ajuste a cada histograma de cada sector.

En los primeros instantes ASOI, por debajo de los 400 μs , se observa una subestimación del contorno para la configuración $f/11$, manifestado en diferencias entre 5° y 10° para el ángulo y aproximadamente 1 mm en la penetración (entre 5 y 10 % de la penetración de los chorros más pequeños). Estas diferencias se pueden deber a los problemas de estimación de las PDF que modelen histogramas con un EDR muy ajustado, especialmente con formas exponenciales (más difíciles de modelar que las PDF normal o log-normal). Igualmente, y como se comentó previamente, los chorros pequeños, presentan una resolución espacial baja, por lo que los contornos están conformados por un número pequeño de píxeles. Esto dificulta el ajuste de las líneas de regresión para el cálculo del ángulo.

El procesado con el algoritmos 1D-LRT optimizado (modelado el histograma con la PDF que mejor se ajusta a la distribución de fondo), muestra resultados muy positivos para los diferentes tipos de ejemplos de imágenes que se han tenido en cuenta en este trabajo. El modelado de los histogramas con las diferentes funciones se requiere por la forma de las distribuciones de fondos altamente dispersores en maquetas reactivas y la combinación de diferentes fuentes de dispersión en maquetas isotermas. De la misma manera, el grado de sensibilidad de los sistemas de adquisición afecta el EDR de las imágenes y con ello el perfil de los histogramas. No obstante, los resultados de

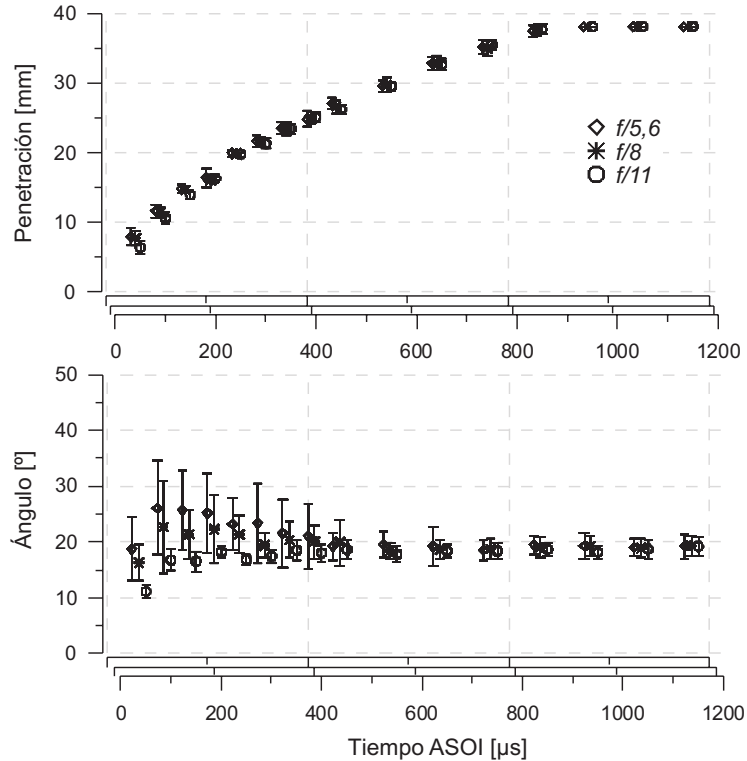


Figura 4.25: Penetración y ángulo medio de imágenes registradas con diferentes configuraciones de apertura de diafragma. Se han desfasado los valores de tiempo para la mejor presentación de los resultados.

penetración han sido bastante repetitivos salvo pequeñas diferencias en casos especiales de iluminación o sensibilidad deficiente. Con el ángulo, se observa una mayor variabilidad en los primeros instantes de tiempo, aunque el valor estable presenta pocas diferencias siempre que la iluminación sea adecuada.

4.5. Resumen y conclusiones

En el capítulo se propone una metodología para la visualización y caracterización macroscópica de chorros Diesel de toberas de múltiples orificios en instalaciones provistas con uno o más accesos ópticos amplios. Una parte importante del trabajo es la descripción de la secuencia completa de los algoritmos de procesamiento de las imágenes: pre-procesado, segmentación y post-procesado. El algoritmo de segmentación propuesto, se basa en el estudio y

caracterización de los histogramas utilizando diferentes funciones de densidad de probabilidad que los modelen apropiadamente. Con la obtención de las funciones, que es la descripción de la distribución de la radiación dispersada por las clases chorro-fondo, y mediante el uso de herramientas de reconocimiento de formas, se calcula un nivel digital umbral para cada sector de imagen que optimiza el proceso de segmentación.

En el antecedente directo del presente trabajo [1], se consideraba la luminosidad de las clases chorro y fondo normalmente distribuidas en imágenes adquiridas con la configuración de iluminación trasera difusa. A diferencia de estas imágenes, compuestas por la sombra del chorro antepuesto a un fondo homogéneamente iluminado, en las nuevas, es el chorro el que se ilumina mientras el fondo lo conforman: la dispersión de la radiación por el combustible y gas remanente, reflejos en la instalación, y en el caso de imágenes en maqueta reactiva, por la dispersión por las partículas del hollín. Estas características condicionaron las formas de los histogramas de las nuevas imágenes por lo que fue necesario un estudio de caracterización con nuevas funciones de densidad de probabilidad.

En la caracterización de los histogramas se observaron dos cualidades particulares que son la base del desarrollo del algoritmo de segmentación. Por un lado, un pronunciado pico en forma de campana para los niveles digitales bajos del histograma que pertenecen al fondo, y por otro, una gran dispersión para los niveles digitales altos, pertenecientes al chorro. La forma de campana no siempre es simétrica, llegando en ocasiones a presentar un máximo muy marcado en el nivel cero (negro absoluto). Las funciones elegidas para modelar estas formas fueron la normal o gaussiana, la log-normal y la gamma, de la cual la exponencial negativa es un caso particular con forma de ‘J’ inversa. Así la función que mejor se ajusta a los niveles bajos del histograma, es la PDF_B que mejor caracteriza la clase fondo.

La evaluación del ajuste se lleva a cabo mediante la estimación de la correlación lineal (R^2) entre los valores de la función de probabilidad PDF_B y los valores de frecuencia de los niveles digitales en el histograma expresados como $pc(x)$. Esta evaluación se realiza ya que los resultados del ajuste lineal están más influenciados por los niveles digitales de mayor frecuencia que por aquellos que muestran mayor dispersión, los del chorro.

Con la PDF_B que mejor se ajusta al histograma, se calcula un umbral a priori (T_{ap}) de selección para la estimación de la función que caracteriza al chorro (PDF_S). Ya que las distribuciones de clases se pueden superponer en el histograma, se requiere considerar el error de estimación de las funciones de probabilidad. La definición del umbral óptimo de selección (T) que considere

estos errores de estimación y las distribuciones de las clases a segmentar, se obtiene mediante la implementación del algoritmo 1D-LRT.

Las bondades del uso del algoritmo 1D-LRT, queda plasmada en los resultados según se segmente con un umbral fijo o un umbral particular para cada sector de imagen. En el caso de utilizar un umbral fijo, el éxito estará condicionado a la repetitividad de las imágenes y a que las distribuciones de las clases por sectores sean similares. No obstante, el cálculo de un umbral particular por sector de imagen tiene en cuenta problemas tan comunes como fluctuaciones o iluminación no homogénea y el deterioro de las propiedades ópticas del aire o de los accesos. Por otro lado, al no considerarse la distribución del chorro o los errores de estimación por la superposición de las distribuciones, es fácil encontrarse con casos de sub o sobrestimación de los contornos calculados. Este problema se ejemplifica al utilizarse el T_{ap} como umbral de selección; se ha observado que el resultado depende mucho del valor empírico k de la ecuación 4.16. No obstante, en la segmentación con el 1D-LRT, esta dependencia es mínima.

Mediante el análisis comparativo del tiempo de procesado, según se segmentara con la PDF_B normal o con la PDF_B que mejor modele las distribuciones de fondo, se observó un aumento del 100 % en el tiempo requerido para la estimación estadística que buscara el mejor valor de R^2 . No obstante, este incremento en el tiempo de estimación, solo significó un aumento del 30 % en el tiempo total de procesado. Este fenómeno se observa ya que se requieren mayores recursos del sistema para la lectura de las imágenes y almacenamiento de resultados, que para la estimación estadística de las nuevas y más complejas funciones de densidad de probabilidad. Con el aumento en el tiempo de procesado se observa igualmente un aumento en la calidad de la información. De la figura 4.13 se concluye que las nuevas imágenes presentan distribuciones que en ocasiones distan del criterio de normalidad, si esta no se cumple se produce una sobrestimación del contorno y con ello diferencias, especialmente, en la medida del ángulo.

Además de por los elementos que conforman la clase fondo, los perfiles de los histogramas están condicionados por las configuraciones de iluminación y visualización. Concretamente, dos factores que los afectan son la configuración de la apertura del diafragma, que determina la cantidad de radiación que alcanza el sensor de los sistemas de adquisición, y la posición de las fibras de iluminación. En instalaciones con acceso único, el rango de posibilidades suele ser muy limitado debido a las características de la configuración óptica. No obstante, en instalaciones con varios accesos, las opciones son mayores, motivo por el cual se realizó, inicialmente una evaluación subjetiva de la apa-

riencia de las imágenes, para luego evaluar sus histogramas y como afectan sus características a los resultados del procesado automático.

Del análisis visual se observaron diferencias importantes según la posición relativa entre los chorros y la dirección del haz radiante. Si los chorros están bien iluminados (la radiación se distribuye apropiadamente por la cámara de inyección iluminando las gotas de combustible) se podrán calcular y modelar exitosamente los histogramas de cada sector de imagen. Aunque se observaron diferencias entre imágenes para diferentes posiciones de iluminación, en casi todos los casos, fue posible la correcta interpretación de las distribuciones y por lo tanto la segmentación fue exitosa. No obstante, si la iluminación es deficiente, la radiación dispersada por las gotas de combustible será igualmente deficiente, pudiendo no ser registrada por los sistemas de adquisición. Un ejemplo se observa en la configuración del punto 8 del estudio paramétrico de § 4.2.

En cuanto a la configuración de la apertura del diafragma, esta afecta directamente la sensibilidad de los sistemas de adquisición y con ello el rango dinámico efectivo (EDR) de los histogramas. En los casos con EDR amplios (sin que se presentase la saturación de los sensores de las cámaras) no se encontraron mayores complicaciones a la hora de estimar las funciones características que los modelaran. No obstante, en casos con EDR muy pequeño, las complicaciones fueron mayores, especialmente en imágenes con fondos poco dispersores. En estos casos, la tendencia de la distribución fue a tomar una forma de ‘J’ inversa similar a la función exponencial negativa con la cual se pudo estimar un porcentaje medio del total de los chorros.

Aunque en casos de iluminación o sensibilidad pobre, el proceso de segmentación presentó algunas complicaciones, la implementación de nuevas funciones permitió aumentar el porcentaje de contornos detectados. Con la información del color de algunos sistemas de adquisición, se pueden, además, ampliar las probabilidades de encontrar una función que los modele mediante el cálculo de un histograma para cada componente del color en cada sector de imagen (tres en el espacio RGB). Todas estas mejoras han conseguido que los resultados de penetración para diferentes configuraciones, sean bastante repetitivos salvo pequeñas diferencias en casos especiales de iluminación o sensibilidad deficiente. Con el ángulo, se observa una mayor variabilidad en los primeros instantes de tiempo, aunque el valor estable presenta pocas diferencias siempre que la iluminación sea adecuada.

Bibliografía

- [1] Palomares A. *Análisis de imágenes de chorros diesel*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2001.
- [2] Pastor J.V., Juliá J.E., Zapata L.D. y Buitrago J.E. “Visualización y procesamiento digital de imágenes para la caracterización macroscópica del chorro diesel isoterma”. *XV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Cádiz*, 2002.
- [3] Pastor J.V., Payri R., López J.J. y Juliá J.E. “Effect of injector nozzle geometry of diesel engines on the macroscopic spray characteristics by means of optical techniques”. *Fuel injection Systems Conference, IMechE*, 2003.
- [4] González R.C. y Woods R.E. *Digital image processing*. Prentice Hall, 2nd ed., ISBN 0-201-18075-8, 2002.
- [5] Russ J.C. *The image processing handbook*. CRC press, 3rd ed., ISBN 0-8493-2532-3, 1998.
- [6] Cheng H.D., Jiang X.H., Sun Y. y Wang J. “Color image segmentation: advances and prospects”. *Pattern Recognition*, Vol. 34, pp. 2259–2281, 2001.
- [7] Lukac R., Plataniotis K.N. y Hatzinakos D. “Color image zooming on the bayer pattern”. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 15, pp. 1475–1492, 2005.
- [8] Imaging PCO. *PixelFly, operation instructions*. PCO. Imaging, 2002.
- [9] Shao J., Yan Y., Greeves G. y Smith S. “Quantitative characterization of diesel sprays using digital imaging techniques”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 14, pp. 1110–1116, 2003.
- [10] Seneschal J., Maurin B., Champoussin J.C. y Ducottet C. “A fully automatic system for the morphology characterization of high pressure diesel sprays”. *SAE paper 2004-01-0025*, 2004.
- [11] Cronhjort A. y Wåhlin F. “Segmentation algorithm for diesel spray image analysis”. *Applied Optics*, Vol. 43, pp. 5971–5980, 2004.
- [12] Pal N.K. y Pal S.K. “A review on image segmentation techniques”. *Pattern Recognition*, Vol. 26, pp. 1277–1294, 1993.

-
- [13] Duda R.O., Hart P.E. y Stork D.G. *Pattern classification*. Wiley, 2nd ed., ISBN 0-471-05669-3, 2001.
- [14] Fukunaga K. *Introduction to statistical pattern recognition*. Academic Press, 2nd ed., ISBN 0-12-269851-7, 1990.
- [15] Pastor J.V., Arrègle J. y Palomares A. “Diesel spray image segmentation with a likelihood ratio test”. *Applied Optics*, Vol. 40, pp. 1–10, 2001.
- [16] Glasbey C.A. “An analysis of histogram-based thresholding algorithms”. *Graphical Models and Image Processing*, Vol. 55, pp. 532–537, 1993.
- [17] Sahoo P.K., Soltani S. y Wong K.C. “A survey of thresholding techniques”. *Graphical Models and Image Processing*, Vol. 41, pp. 233–260, 1988.
- [18] Payri F., Pastor J.V., Palomares A. y Juliá J.E. “Optimal feature extraction for segmentation of diesel spray images”. *Applied Optics*, Vol. 43, pp. 2102–2111, 2004.
- [19] Pratt W.K. *Digital image processing*. Wiley-Interscience Publication, 3rd ed., ISBN 0-471-37407-5, 2001.
- [20] Hiroyasu H. y Arai M. “Structures of fuel spray in diesel engines”. *SAE paper 900475*, 1990.
- [21] Naber J.D. y Siebers D.L. “Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays”. *SAE paper 960034*, 1996.
- [22] López J.J. *Estudio teórico-experimental del chorro libre diesel no evaporativo y de su interacción con el movimiento de aire*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003.
- [23] Payri F., Payri R., Salvador F.J. y Gimeno J. “Comparison between different hole to hole measurement techniques in a diesel injection nozzle”. *SAE paper 2005-01-2094*, 2005.

Capítulo 5

Aplicación de las técnicas de Schlieren y Shadowgraph al estudio del chorro Diesel

Contenido

5.1. Introducción	149
5.2. Fundamentos de las técnicas	150
5.2.1. Propagación de la luz en medios heterogéneos	151
5.2.2. Técnicas de Schlieren y Shadowgraph	153
5.2.3. Factores que afectan la sensibilidad	156
5.2.3.1. Tipo de iluminación	157
5.2.3.2. Tamaño finito de la fuente	158
5.2.3.3. Filtrado espacial	160
5.2.3.4. Lentes y espejos	163
5.2.3.5. Sensores	165
5.3. Aplicación al estudio del chorro Diesel	165
5.3.1. Introducción	165
5.3.2. Estudios preliminares	168
5.3.2.1. Instrumental	168
5.3.2.2. Procedimiento de alineación y enfoque	174
5.3.3. Estudios en la configuración de transmisión	176
5.3.3.1. Visualización de ondas de presión	177
5.3.3.2. Chorro evaporativo	182
5.3.4. Estudios en la configuración de doble paso	191

5.4. Procesado de las imágenes	206
5.4.1. Características de los histogramas	207
5.4.2. Pre-procesado	211
5.4.2.1. Pre-segmentación y cálculo de histogramas	211
5.4.2.2. Homogenización del fondo	212
5.4.3. Segmentación: adaptación del algoritmo 1D-LRT . .	215
5.4.4. Post-procesado	218
5.5. Resumen y conclusiones	219
Bibliografía	223

5.1. Introducción

Las técnicas de visualización de Schlieren y Shadowgraph¹² han sido durante años una valiosa herramienta usada en las diferentes disciplinas de la ingeniería y la ciencia en el estudio de los fluidos. Con su aplicación ha sido posible observar fenómenos que de otra manera estarían ocultos a los sistemas de visualización convencionales como el ojo humano. Su principio de funcionamiento se basa en el registro de las débiles perturbaciones de la radiación al atravesar un medio ópticamente heterogéneo. La aplicación más clara es la visualización de gases, donde el índice de refracción varía por los gradientes de densidad.

Los primeros registros del uso de las técnicas datan de mediados del siglo XVII cuando Robert Hooke, padre de la óptica en medios heterogéneos, observó que la desviación de los rayos de luz provocada por la llama de una vela daba lugar a la aparición de sombras al proyectarse éstos, sobre en una pared. No obstante, se le atribuye a A. Toepler y L. Foucault el establecimiento, a finales del siglo XIX, del montaje óptico básico de la técnica Schlieren tal y como se conoce hoy en día.

Dentro del campo de investigación de los MCIA, ambas técnicas han sido implementadas en el estudio de la evaporación del chorro y del desarrollo de la combustión. No obstante, en el departamento, estas no habían sido usadas por lo que el nivel de conocimiento se limitaba a la literatura publicada.

Con el objetivo de evaluar las posibilidades de las técnicas al estudio de los procesos de inyección-combustión, se realiza, en la primera parte del capítulo, una breve explicación de los fundamentos físicos del método y los diferentes factores que pueden afectar a la sensibilidad y por lo tanto a los resultados. Las primeras imágenes tomadas en este trabajo, mostraron ser un tanto atípicas si se comparaban con las observadas en la literatura para el estudio de toberas reales. Esto llevó a un análisis de las posibilidades de las técnicas en sus diferentes configuraciones aplicables en las maquetas y motores ópticos con los que cuenta el departamento y que, como se comentó en capítulos anteriores, son de dos tipos: instalaciones con varios accesos amplios e instalaciones con acceso único. Un conocimiento a priori de las instalaciones, permitió definir las mejores configuraciones ópticas y realizar estudios de puesta a punto, análisis de factores de influencia y procedimientos de optimización fuera de motor, mediante la visualización de un chorro de aire comprimido.

¹²El término anglosajón ‘Shadowgraph’ hace referencia a la técnica, mientras ‘shadowgraphy’ es el uso del instrumento cuyo resultado son las imágenes o ‘shadowgrams’.

Definidas las configuraciones, se implementó en a las diferentes instalaciones y se realizaron las experiencias que aportaran el conocimiento necesario para la correcta interpretación de los resultados. Esta parte del trabajo, se detalla en el apartado 5.3. Aplicación al estudio del chorro Diesel. Como apoyo al trabajo de puesta a punto, se visualizaron las ondas de presión en una instalación provista con un gas de alta densidad. En estas condiciones el sonido viaja a menor velocidad y la inyección se realiza en un ambiente a baja presión y temperatura con cambios mínimos en el índice de refracción.

El esfuerzo más importante de este trabajo has sido en la puesta a punto y análisis de las técnicas para la visualización de chorros evaporativos, sin y con combustión, en las diferentes configuraciones experimentales. Un análisis de imágenes adquiridas con diferentes niveles de filtrado, mostraron poca dependencia de las características del chorro a este parámetro. En condiciones reactivas, en la variante de transmisión, se registraron nuevos fenómenos, aunque las imágenes presentaron características algo diferentes a las de los ensayos de puesta a punto con chorros de aire comprimido. En la variante de doble paso para el estudio de toberas reales de múltiples orificios, se evaluaron diferentes configuraciones mediante variaciones en la dirección del haz colimado. El estudio se llevó a cabo para diferentes condiciones termodinámicas de gas donde se realizó la inyección, mostrando variaciones en las imágenes según la calidad de la evaporación del combustible.

Los algoritmos propuestos para el análisis automático de las imágenes, que se presenta en el apartado 5.4, han tomado como base los presentados en el capítulo anterior para el procesado de las imágenes de chorro líquido. Sin embargo, ha sido necesario realizar adaptaciones o modificaciones, tanto en el pre-procesado para eliminación de ruido y facilitar la segmentación, como en el post-procesado. Fue necesario, además, realizar pequeñas modificaciones a los algoritmos, especialmente en el proceso de segmentación.

El capítulo se cierra con un resumen del trabajo realizado y las principales conclusiones obtenidas.

5.2. Fundamentos de las técnicas

Los sistemas de percepción de radiación luminosa como el ojo humano y los sistemas convencionales de adquisición de imagen, suelen percibir únicamente la intensidad y los contrastes de color de la radiación que le incide. No obstante, estos sistemas no son capaces de discernir las diferencias de fase de un haz radiante que atraviesa un medio transparente con heterogeneidades en el índice

de refracción. El objetivo de las técnicas de Schlieren y Shadowgraph es el de traducir estos cambios de fase, en diferencias de intensidad y, en ocasiones, diferencias de color de manera que se puedan registrar los fenómenos que de otra manera no podrían ser observados.

5.2.1. Propagación de la luz en medios heterogéneos

Según la concepción de la óptica geométrica, la luz se propaga en el vacío o en un medio transparente homogéneo en trayectorias rectilíneas llamadas *rayos*. Por otro lado, debido a la naturaleza electromagnética de la radiación, se pueden definir superficies hipotéticas llamadas *frentes de onda* que son el lugar geométrico en el cual el campo electromagnético vibra en fase. Los *rayos* de un haz, serán normales a la dirección de los *frentes de onda* en todas las direcciones.

Si la radiación proviene de una fuente puntual (PL)¹³, los frentes de onda serán esferas concéntricas centradas en PL y la luz se propaga radialmente en rayos normales a las superficies de los frentes de onda como se observa en la figura 5.1(a). Cuando los frentes de onda están suficientemente alejados de la fuente, la onda esférica puede considerarse como una onda plana, de modo que los frentes pueden considerarse planos perpendiculares a la dirección de propagación de los rayos que siguen trayectorias paralelas entre ellos (figura 5.1(b)).

En un medio *ópticamente heterogéneo*, donde el índice de refracción n no es el mismo en todos los puntos, el haz de rayos es perturbado creando diferencias de fase y dirección: los frentes de onda se distorsionan y la dirección de los rayos cambia. Para ejemplificar lo anterior, en la figura 5.1(c) un haz de rayos paralelos atraviesa un medio heterogéneo acotado por los accesos ópticos W_1 y W_2 . Los frentes de onda de la radiación emergente, después de atravesar el medio heterogéneo, dejan de ser planos y los rayos normales a los frentes de onda se desvían un ángulo ε de su trayectoria original.

La desviación o refracción de los rayos será la que permita la visualización de las heterogeneidades del medio. Puesto que la mayoría de los objetos no provocan efectos de difracción significativos, será suficiente la explicación del fenómeno mediante óptica geométrica [1], excepto en la discusión de la resolución de la imagen, para lo que resulta inevitable acudir a la teoría de difracción [2].

¹³Una fuente es puntual si el tamaño del haz es del orden de la longitud de onda λ de la radiación emitida.

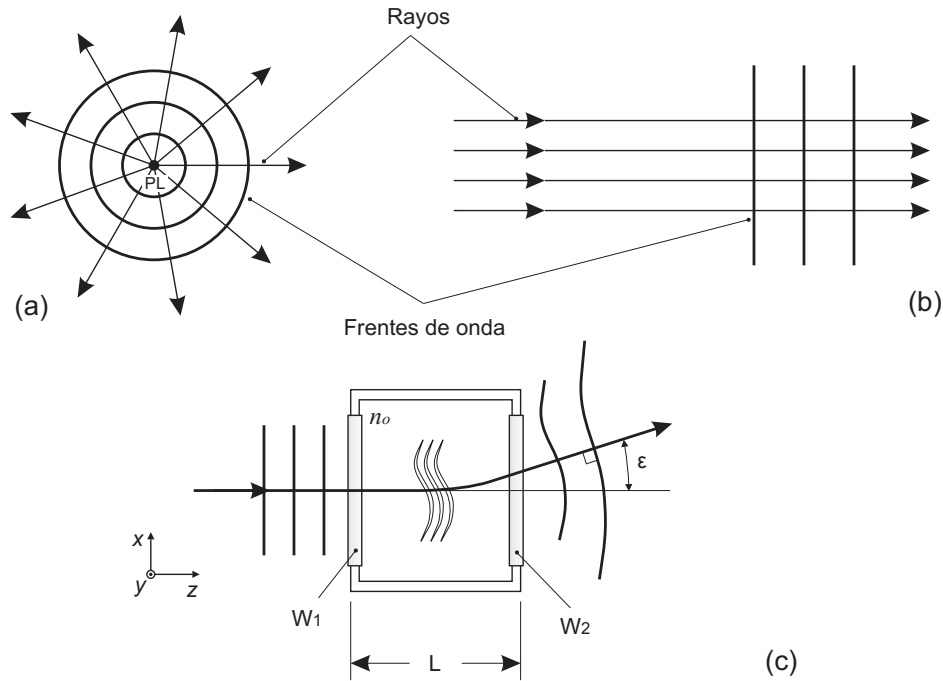


Figura 5.1: Propagación de la radiación y definición de los frentes de onda electromagnética a una distancia finita (a) o infinita (b) de la fuente puntual (PL). Al atravesar un medio ópticamente heterogéneo, los frentes de onda se distorsionan y los rayos cambian de dirección.

Settles [3] presenta, mediante ecuaciones de óptica geométrica, una expresión matemática para la cuantificación del valor de la desviación ϵ . En un volumen de control donde la radiación incidente sigue la trayectoria a lo largo del eje óptico (z), las heterogeneidades del medio refractan o desvían los rayos en proporción a los gradientes de índice de refracción instantáneo en el plano (x, y). La desviación total al atravesar medio heterogéneo de longitud L , entre los accesos W_1 y W_2 , se calcula como:

$$\epsilon_x = \frac{L}{n_o} \frac{\partial n}{\partial x}, \quad \epsilon_y = \frac{L}{n_o} \frac{\partial n}{\partial y} \quad (5.1)$$

donde n_o es el índice de refracción del medio que rodea al objeto causante de las heterogeneidades, quedando claro que no es el valor global de n el que causa la refracción, sino los gradientes de éste en las direcciones x e y en el volumen de control ($\partial n/\partial x$ y $\partial n/\partial y$).

Las heterogeneidades en un medio pueden ser originadas por mezclas de

diferentes sustancias o por distribuciones de presión o temperatura en una misma sustancia o mezcla de ellas. En flujos gaseosos, el índice de refracción tiene relación directa con la densidad, observándose variaciones asociadas a la composición del gas apenas en el tercer o cuarto decimal [3, 4]. Esto significa, que si los cambios de densidad son pequeños, el sistema de percepción debe ser especialmente sensible.

De la misma manera, existen relaciones de n y ρ para líquidos y sólidos que presentan un desarrollo más complejo que el de los gases [5]. En estos materiales la refractividad suele ser mucho mayor por lo que se requieren sistemas ópticos menos sensibles para su visualización. Moore [6], por ejemplo, presenta algunos valores típicos de gradientes de índice de refracción de materiales utilizados en aplicaciones ópticas.

Los métodos de visualización aquí presentados, suelen usarse para obtener información semicuantitativa, mediante imágenes digitales, del objeto causante de la heterogeneidad óptica. Las medidas de concentraciones de densidad son posibles en los casos donde exista una relación directa y unívoca entre los cambios, por ejemplo, de concentración y de n en medios isoterms [4, 7]. En la mayoría de los casos observados en los MCIA no es posible realizar esta identificación, ya que los cambios de n son debidos a varias causas. En el caso de chorros evaporativos, los cambios de índice de refracción dependerán tanto de la concentración de la fase vapor como de los cambios de temperatura local. Además se presenta una dificultad adicional en las zonas de coexistencia de las fases líquido-vapor.

5.2.2. Técnicas de Schlieren y Shadowgraph

Schlieren y Shadowgraph son dos técnicas empleadas en la interpretación de los cambios de fase de la radiación al propagarse por un medio ópticamente heterogéneo. Estas convierten los cambios de fase de los frentes de onda en diferencias de intensidad que son luego presentadas en forma de imágenes. Por sus características ambas técnicas están fuertemente relacionadas, aunque existen diferencias que determinan la sensibilidad en el proceso de visualización.

Shadowgraphy

Si la radiación se propaga en un medio homogéneo, esta se puede proyectar en una pantalla o arreglo de sensores y el resultado final será una imagen uniformemente iluminada. No obstante, la desviación de los rayos originada por el efecto total de los gradientes de densidad en un medio ópticamente

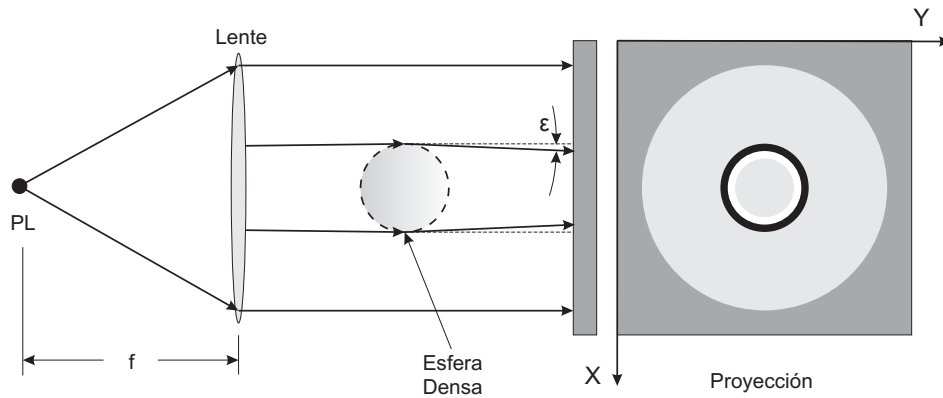


Figura 5.2: Diagrama óptico simple de un sistema de shadowgraphy con haz colimado. Los rayos paralelos se desvían un ángulo ε por la presencia de una esfera de densidad mayor a la del medio circundante, ocasionando cambios de intensidad en la proyección de la imagen.

heterogéneo, producirá una imagen de sombras denominada shadowgram, con gradientes de intensidad luminosa; existirán zonas más brillantes impactadas por un mayor número de rayos (desviados y no desviados), y zonas poco luminosas por la ausencia de los rayos refractados.

Para ejemplificar lo anterior, se puede considerar el sistema básico de shadowgraphy de la figura 5.2. En él, un haz colimado por una lente atraviesa una esfera más densa que el medio circundante. Dicha esfera actúa como una lente convergente que desvía los rayos hacia su interior. La imagen proyectada muestra una región más luminosa hacia la cual se dirigen los rayos desviados y otra más oscura donde estos no llegan. Dicho de otro modo, una región recibe cierta cantidad extra de radiación, mientras que otra región pierde parte de la luz que recibía, resultando más oscura que el fondo que la rodea. La luminosidad de un punto en la imagen dependerá entonces de los gradientes de los ángulos refractados $\partial\varepsilon/\partial x$ ¹⁴, y por lo tanto, como se muestra en la ecuación 5.1, de la segunda derivada del índice de refracción $\partial^2 n/\partial x^2$ [3, 8].

Una variante de la configuración simple de shadowgraphy consiste en el uso de lentes adicionales cuya función es la de modificar o adaptar el tamaño

¹⁴Aunque el planteamiento es similar para los dos ejes de coordenadas en el plano de refracción (x, y) , para simplificar, solo se hace referencia uno de ellos.

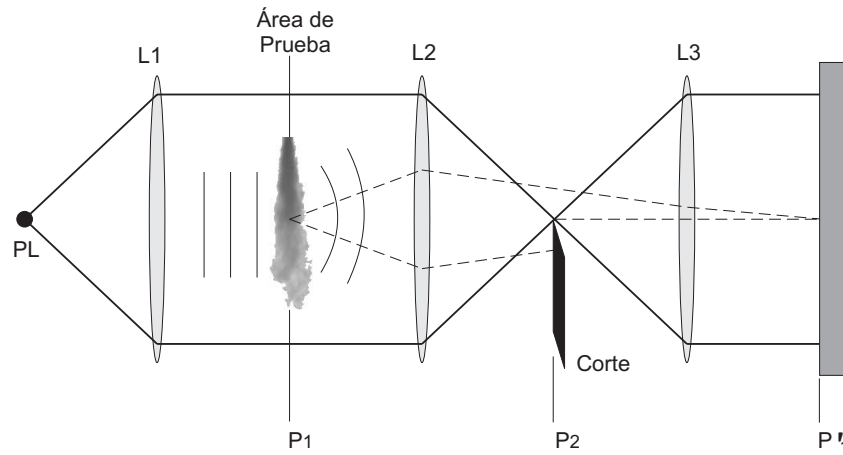


Figura 5.3: Diagrama básico de Schlieren por transmisión. Difiere de la de shadowgraphy en el filtrado espacial en el plano de Fourier.

de la imagen resultante para su registro. La configuración óptica es similar a la de Schlieren, aunque en este caso las lentes adicionales son usadas para crear una imagen, virtual o real, del shadowgram.

Schlieren por transmisión

El esquema de la configuración básica de Schlieren por transmisión se presenta en la figura 5.3. Un haz de luz, procedente de una fuente puntual, es colimado por una primera lente **L1** propagándose por un medio heterogéneo de manera similar al sistema de shadowgraphy. En este caso, una segunda lente **L2** recoge la radiación y la proyecta en el plano focal de la lente P_2 . En ausencia de heterogeneidades, en el plano focal se proyecta una imagen inversa de la fuente radiante.

Según la teoría de difracción de Fraunhofer, la imagen proyectada en P_2 es la transformada de Fourier de los patrones del frente de onda después de atravesar el medio heterogéneo, por lo que en un sistema convencional de Schlieren se suele hacer referencia a este plano como *plano de Fourier*. El uso de una tercera lente **L3**, permite generar una imagen inversa de P_1 en P'_1 , que es la transformada inversa de la proyección en P_2 y la imagen de salida del sistema.

Las frecuencias espaciales bajas de los patrones de difracción de Fraunhofer en P_2 (transformada de Fourier), están conformadas por la radiación no difractada en ausencia de heterogeneidades. También conocido como or-

den ‘cero’, éstas se encuentran en el centro del plano de Fourier y contienen la información de los detalles gruesos de la imagen. Por el contrario, las frecuencias altas, contienen los detalles finos donde se encuentran los principales gradientes de n .

Mediante el filtrado espacial apropiado con sistemas de diafragma, que pueden ser finas cuchillas, se consigue eliminar determinadas frecuencias resaltando el efecto producido por los gradientes de índice de refracción. Dicho de otro modo, se elimina un cierto porcentaje de la radiación difractada y no difractada, traducido en cambios de intensidad. Si la radiación filtrada es el orden ‘cero’ del los patrones de Fraunhofer, desaparece la intensidad del fondo de la imagen de salida. De igual manera, si el ángulo de difracción (ε) es muy grande, una parte de la radiación podrá salir del sistema de lentes y no ser registrado por los sistemas de adquisición. Por el filtrado de las frecuencias, a diferencia de las imágenes de shadowgraphy, en las de Schlieren la luminosidad de un punto esta determinada por la derivada espacial del índice de refracción $\partial n/\partial x$ y no de los gradientes de ε [3, 8].

Configuración de doble paso

La configuración de doble paso ha sido implementada en el estudio de los MCIA, en instalaciones con acceso único. Como se puede observar en el esquema de la figura 5.4, a diferencia de la configuración de transmisión, en la de doble paso la radiación se propaga por el medio heterogéneo para ser luego reflejada por un espejo de fondo M. En su camino de regreso, esta radiación atraviesa nuevamente el medio por lo que el efecto de los gradientes de n es doble. En otras palabras el haz colimado recorre el medio 2L por lo que el valor de ε será mayor (ver ecuación 5.1).

Debido a que la radiación reflejada recorre el mismo camino que la radiación incidente, ha sido necesario el uso de una *lámina semitransparente* o *beam splitter* (BS), cuya función es la de dejar pasar una parte de la radiación mientras el resto es reflejada (50% para el ejemplo de la figura). Con su uso se consigue separar la señal incidente de la emergente. El filtrado espacial de la señal se lleva a cabo de la misma forma que para el caso de transmisión.

5.2.3. Factores que afectan la sensibilidad

A pesar de las diferencias en el principio de funcionamiento de las técnicas de Schlieren y Shadowgraph, ambas son apropiadas para la visualización de fenómenos que se caracterizan por variaciones en el índice de refracción en

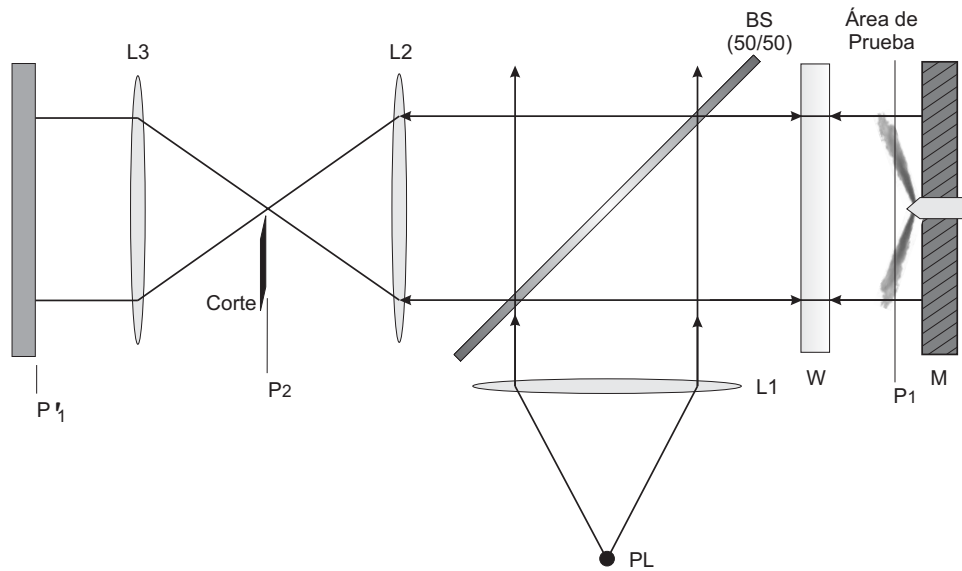


Figura 5.4: Configuración de Schlieren de doble paso. La radiación se refleja en un espejo al atravesar el medio heterogéneo. Una lámina semitransparente facilita la separación de la radiación incidente y reflejada.

medios transparentes. La mayor ventaja de la herramienta de shadowgraphy es su simplicidad comparada con el mayor número de elementos requeridos en un montaje de Schlieren. No obstante, esta última, por su mayor sensibilidad, es más apropiada para el estudio de fenómenos en los cuales las perturbaciones de la radiación son muy pequeñas, por lo que los gradientes de intensidad (ΔI) y contrastes son menores.

Aunque existen factores de sensibilidad que diferencian las técnicas (filtrado espacial único de Schlieren), estas comparten elementos comunes que afectan igualmente la calidad de los resultados: estos son la iluminación y las características de los elementos ópticos y de adquisición de imagen.

5.2.3.1. Tipo de iluminación

Existen dos factores importantes a la hora de elegir un sistema de iluminación para una aplicación de Schlieren o shadowgraphy: por un lado las características de la radiación y por otro su coste.

Según la naturaleza de la radiación esta puede ser monocromática o policromática: una fuente monocromática genera un haz radiante con una banda de emisión muy estrecha de longitud de onda, mientras que una fuente poli-

cromática lo hace en un rango más amplio del espectro. Las fuentes que las generan son fuentes láser para el caso monocromático o fuentes provistas de lámparas de gran intensidad (incandescentes, halógenas, etc.), pulsadas o no, que suelen emitir en un rango cercano al rango visible del espectro electromagnético, por lo que suele referirse a ellas como fuentes de luz blanca.

Las ventajas de utilizar fuentes monocromáticas (normalmente láser de Ar^+ , Nd:YAG, diodos láser o rayos X), son su alta direccionalidad y densidad de energía [9–13]. Esta primera propiedad facilita la obtención de haces colimados y la naturaleza monocromática del haz evita la presencia de aberraciones cromáticas. Igualmente, permite visualizar fenómenos de baja intensidad en presencia de otros como la combustión incandescente. Así, con el uso de filtros apropiados, se puede filtrar la señal y registrar solo la información de Schlieren. La principal desventaja de las fuentes láser es la aparición de patrones de interferencia causados por la superposición de los frentes de onda, los efectos asociados a la coherencia de la luz como el ‘speckle’, y los altos precios que suelen alcanzar.

Las ventajas de las fuentes de luz blanca son que debido a su policromatismo, se evita la visualización de los patrones de interferencias de las fuentes monocromáticas; además proporcionan mayor información sobre los cambios del índice de refracción n , en sistemas algo más complejos como el ‘color Schlieren’ [14]. Otra de las grandes ventajas de estas fuentes son su portabilidad y bajo coste. Para conseguir una fuente de pequeñas dimensiones, generalmente es necesario un sistema condensador como el presentado en la figura 5.5 junto con fibras ópticas para conducir la radiación. Este aditamento adicional unido a la poca direccionalidad, hacen que las potencias obtenidas sean menores que con las fuentes láser. Para la manipulación del haz se requieren lentes acromáticas ya que la distancia focal de una lente no corregida dependerá de la longitud de onda (λ).

El control del tiempo de exposición en la composición de la imagen, generalmente se hace con el tiempo de obturación de la cámara, para fuentes continuas, y con la duración del pulso del láser o flash para fuentes pulsadas.

5.2.3.2. Tamaño finito de la fuente

Aunque los esquemas presentados previamente se desarrollan a partir de fuentes puntuales de iluminación, los modelos reales tienen dimensiones finitas, es decir lo que se maneja en los experimentos son fuentes de luz extensas.

Una fuente extensa de altura y (en un modelo unidimensional), puede tratarse como la suma de varias fuentes puntuales. El funcionamiento del sistema

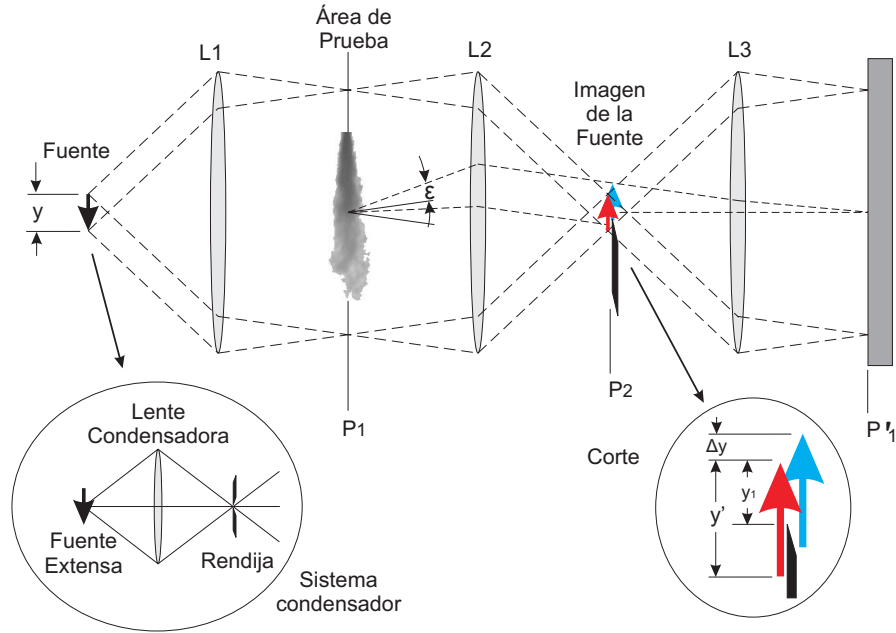


Figura 5.5: Diagrama básico de Schlieren con fuente de luz finita y sistema condensador lente-rendija. Sección ampliada del filtrado espacial.

será similar al esquema mostrado en la figura 5.3, salvo que tras ser colimado el haz, el total de los rayos no son perfectamente paralelos. Si la distancia entre la fuente y L1 es la focal de la lente, se producirá un haz de rayos paralelos para cada punto de la fuente. No obstante, cada haz colimado de cada punto de la fuente tendrá un ángulo diferente de propagación.

Para ilustrarlo, en la figura 5.5 se dibujan los dos rayos correspondientes a los puntos extremos de la fuente. Estos rayos después de colimados, son enfocados en el plano de prueba P_1 donde la iluminación es uniforme, por lo que todos los rayos serán igualmente afectados por las heterogeneidades del medio.

La imagen que se genera en el plano de Fourier y que es la transformada de la imagen en P_1 , estará compuesta en primer lugar por las frecuencias bajas o rayos no desviados. Las frecuencias altas de la transformada, estarán compuestas por la superposición de diferentes imágenes cada una causada por los gradientes de n en cada punto del área de prueba. Las imágenes tienen la forma de la de la fuente y tanto sus dimensiones (altura y' en la figura) como su posición, dependerán de la relación de las distancias focales de las lentes colimadora y decolimadora (L1 y L2 respectivamente).

Como ejemplo, si se considera solo un punto en P_1 , la desviación ε_y ya no será aplicada a un rayo, sino a un haz correspondiente a los diferentes puntos de la fuente. El esquema de este desplazamiento se muestra en la figura 5.5 mediante una flecha desplazada Δy de la imagen no desplazada, definida como:

$$\Delta y = f_2 \cdot \varepsilon_y \quad (5.2)$$

donde f_2 es la distancia focal de L2 [8].

La nitidez de la imagen en el plano de salida P'_1 , dependerá en gran medida tanto de las dimensiones y forma de la fuente como de la de posición relativa del medio heterogéneo en la zona de prueba. Si la fuente es de grandes dimensiones, la profundidad de campo, que es la región alrededor del plano de prueba donde la imagen se puede enfocar correctamente, será muy estrecha. Por el contrario, cuando la fuente es pequeña, la profundidad de campo aumenta.

Tanto el tamaño como la forma de la fuente se puede manipular con un sistema condensador como el que se observa en la figura 5.5. En general, el sistema esta compuesto por una lente condensadora y un orificio circular o rendija —arreglo de ellas en aplicaciones especiales con fuentes de grandes dimensiones [3]— La radiación proveniente de la fuente atraviesa la lente condensadora y se proyecta luego en un punto donde se ubica la obstrucción. Esta permitirá pasar solo una parte de la radiación que será la que luego se proyecte sobre la lente colimadora L1. La distancia entre estos dos elementos será la distancia focal de la lente colimadora para que se produzca la colimación del haz.

Un ejemplo del efecto de la profundidad de campo en las imágenes se observa en la figura 5.6. En ella se muestran dos imágenes de chorro de aire comprimido registradas con la técnica de Schlieren en la variante doble paso. Para la reflexión se usó un espejo convencional del cual se pueden apreciar sus imperfecciones a medida que se aumenta la sensibilidad mediante la disminución del tamaño de la fuente radiante: la profundidad de campo disminuye cuando la obstrucción del sistema condensador es un orificio circular de 3 mm de diámetro, y aumenta cuando es un *pin-hole* circular de 500 μm .

5.2.3.3. Filtrado espacial

La presencia de un sistema de diafragma en el uso del instrumento Schlieren, marca la diferencia entre éste y el instrumento de shadowgraphy. La sensibilidad del sistema dependerá del tipo de filtrado espacial que se aplique,

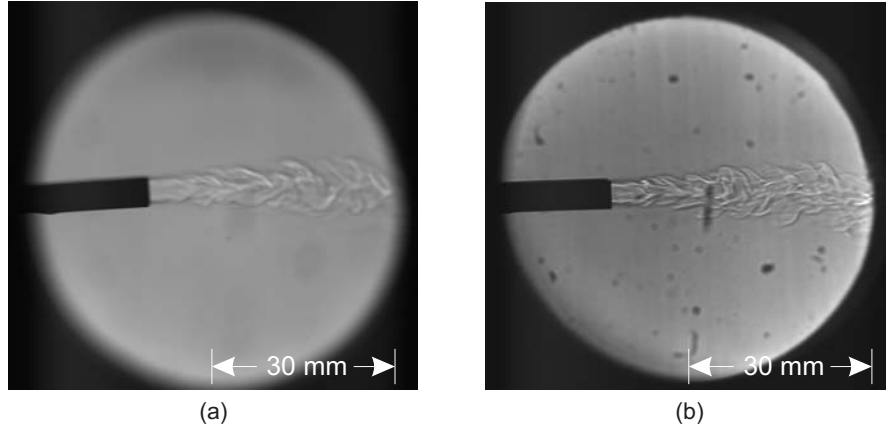


Figura 5.6: Imagen de chorro de aire comprimido obtenidas con la técnica de Schlieren de doble paso con espejo convencional. La luz pasa a través de un sistema condensador con diafragma de apertura circular de 3 mm (a) y 500 μm (b).

variando según las características de los diafragmas. En la literatura es posible encontrar diafragmas con formas de rendija, círculos o puntos, llegando incluso ha encontrarse filtros especiales encargados de discriminar entre diferentes longitudes de onda.

En un modelo simple, donde el filtrado se puede realizar mediante el uso de finas cuchillas, el resultado final es una imagen en escala de niveles digitales representativos de los cambios de intensidad. Un sistema será más sensible si la imagen presenta mayor contraste que otra adquirida con un sistema menos sensible.

La luminosidad de la imagen de salida, representada en valores de nivel de intensidad I , es proporcional a la cantidad de radiación no filtrada y esquematizada como y_1 en la figura 5.5. En presencia de heterogeneidades, los cambios de intensidad ΔI en cada punto de la imagen dependerán del desplazamiento angular del haz, proyectado en el plano de Fourier como Δy (ecuación 5.2). El contraste expresado como:

$$C = \frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta y}{y_1} = \frac{f_2 \varepsilon_y}{y_1}$$

será entonces función tanto del nivel de filtrado como de los gradientes de n (ver ecuación 5.1) y las características de la lente decolimadora L2 [3, 8].

El contraste aumenta cuando, aumentando el nivel de corte, se disminuya el valor de y_1 y por lo tanto la cantidad de radiación total registrada. Si

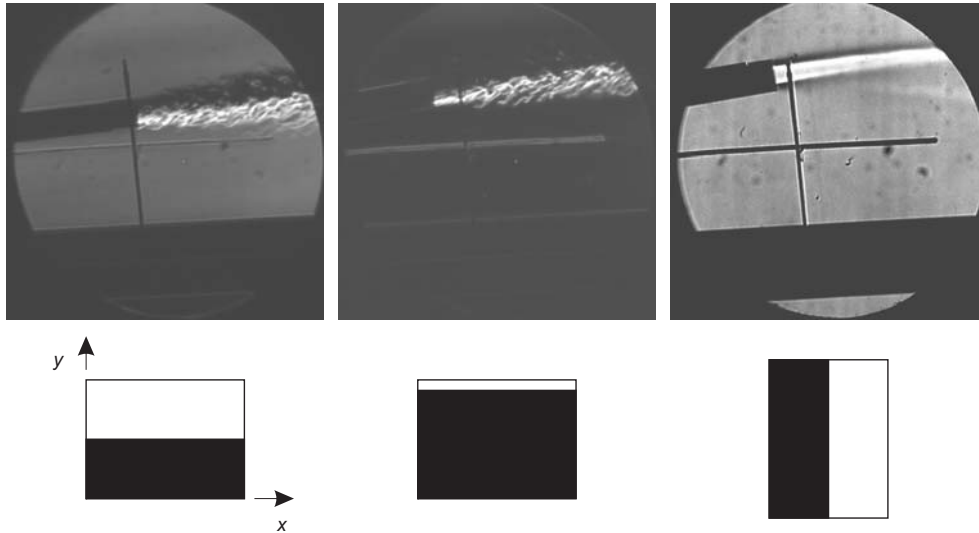


Figura 5.7: Imágenes de chorro de aire comprimido utilizando diferentes configuraciones de corte como se esquematiza en la parte inferior de la imagen —Dos ejemplos de corte horizontal y diferente porcentaje de filtrado y un tercer caso con corte vertical—.

el corte es muy pronunciado, la radiación que alcance el sensor de la cámara corresponderá a la de unos pocos rayos y tanto el fondo como partes de la imagen serán sombras. Es por este motivo que el contraste no puede aumentarse infinitamente debiendo existir un compromiso en la cantidad de filtrado.

La figura 5.7 es un buen ejemplo de cómo tanto la cantidad de corte como su posición afecta los resultados. El ejemplo consta de tres imágenes registradas con la variante de doble paso con espejo convencional. En ellas se inyecta un chorro de aire en sentido horizontal y el corte se realiza con un diafragma de cuchilla de geometría rectangular. Adicional al chorro se pueden observar dos finas líneas negras cruzadas dibujadas sobre el espejo y un cilindro de cristal similar al que se empleará más adelante para el enfoque. En la parte inferior de cada imagen se esquematiza la dirección y la cantidad aproximada de corte sobre el orden ‘cero’ de la transformada.

En las dos primeras imágenes, el diafragma se posiciona horizontalmente, filtrando las componentes $\partial n/\partial y$ del objeto. El filtrado elimina parte de la radiación no refractada y parte de la radiación refractada por debajo del diafragma. Como se observa en la primera imagen de la figura, el chorro aparece dividido en una zona muy iluminada y otra más oscura que el fondo. La primera se deberá a los rayos que han sido desviados en la dirección y y que

no han sido filtrados, y la zona oscura se observa por la ausencia de los rayos filtrados. El fondo aparece uniforme, pero con niveles de intensidad superiores a la zona oscura del chorro.

A medida que se incrementa el corte, el fondo se oscurece y se resaltan los bordes, en su componente horizontal, tanto en las líneas dibujadas sobre el espejo como en el cilindro de cristal y el conducto de aire. En cuanto al chorro, solo se puede identificar claramente la zona iluminada mientras que la mitad oscura no se puede distinguir del fondo al presentar los mismos niveles de intensidad en la imagen. Esto demuestra que el contraste se puede mejorar al incrementar la cantidad de corte, sin embargo, cuando y_1 es muy pequeño, se pueden perder estas diferencias.

Con el posicionamiento vertical del diafragma, desaparece la asimetría del chorro, quien en ausencia de turbulencia, se comporta como un cilindro haciendo converger la radiación al interior. Con el filtrado vertical se marca más las diferencias en la componente $\partial n/\partial x$, observándose apenas diferencias en $\partial n/\partial y$.

Buscando una relación entre los valores de ΔI y los gradientes de densidad, Ouchi *et al.* [15], publican dos imágenes con un único chorro de CO_2 para las dos posiciones de diafragma, horizontal y vertical, presentados en la figura anterior. En ellas se observan resultados similares de chorros simétricos y asimétricos según la posición relativa entre el corte y el chorro. Otros ejemplos se pueden encontrar en Settles [3] para otras configuraciones de diafragmas de corte en el plano de Fourier o combinaciones con sistemas condensadores.

5.2.3.4. Lentes y espejos

Las configuraciones en cuanto al instrumental óptico, tanto para Schlieren como para shadowgraphy, varían según su aplicación. Entre los factores de selección más comunes se encuentran el tamaño del objeto de estudio, la disponibilidad de espacio y accesibilidad al objeto y el coste del montaje. En instalaciones pequeñas, es común contar con lentes para la manipulación de la radiación, sin embargo, en instalaciones de gran envergadura, son los espejos los más frecuentemente utilizados. Se debe recordar, que tanto la profundidad de enfoque del sistema como el tamaño de la transformada en el plano de Fourier, dependen de la distancia focal de la lente o espejo.

Para el primero de los casos, las configuraciones más comunes suelen estar constituidas por dos lentes que cumplan los propósitos del colimado y el decolimado; no obstante, por economía o por espacio, algunos autores utilizan solo una de ellas para cumplir esta doble función [16–18]. El uso de una sola

lente, limita la configuración a unas condiciones particulares y obliga en algunas ocasiones a la implementación de instrumental adicional como láminas semitransparentes.

Uno de los principales problemas encontrados en el uso de sistemas de lentes, son las imperfecciones en ocasiones producidas por defectos de fabricación, formas y acabado. Se debe notar que una lente es un sistema de dos caras pulidas fabricadas con materiales transparentes homogéneos. En cuando a los espejos, es solo una superficie la que entra en contacto con la radiación y suelen contar con recubrimientos especiales que mejoran su calidad. Estas características hacen de estos últimos elementos sean más fáciles de fabricar y por lo tanto más económicos, permitiendo alcanzar mayores dimensiones con muy buenas prestaciones.

Ambos sistemas presentan aberraciones por lo que la distancia focal real será tanto función de la fabricación de la lente o espejo como de la longitud de onda de la radiación. Una de las aberraciones más importantes en las lentes, son las aberraciones cromáticas donde para cada longitud de onda, existirá un foco diferente al cual convergen los rayos. La causa de estas aberraciones es la variabilidad del índice de refracción de los materiales a diferentes longitudes de onda, por lo que no se presenta en los espejos de primera superficie.

En sistemas con un grado de sensibilidad alto, la calidad final de las imágenes se ve comprometida por las aberraciones produciendo resultados difusos y desenfocados. Es por este motivo que los fabricantes ofrecen lentes con diferentes grados de corrección de aberraciones aunque a costa del coste del instrumental.

En cuanto a la implementación de espejos, estos aunque más económicos, lo que hacen es reflejar la radiación, por lo que la información incidente debe ser separada de la emergente. Los mecanismos para este fin van desde el uso de láminas semitransparentes 'Beam Splitter' hasta la modificación del eje de incidencia y salida de la radiación. Un ejemplo de este último mecanismo se observará en la figura 5.10 que corresponde a la configuración de doble paso para visualización en motor.

Los espejos no solo tienen la función de manipulación de la radiación, sino que son indispensables en la configuración de doble paso. Estos espejos pueden, como lo ejemplifica Settles en su libro [3], cumplir la doble función de colimado y decolimado y servir de superficie especular para aumentar la sensibilidad del sistema, o simplemente servir a la implementación del instrumento en condiciones de acceso único. Como se tratará más adelante estos espejos deben tener unas buenas características reflejantes difíciles de encontrar en un motor o porta inyector, según es el caso de este trabajo.

5.2.3.5. Sensores

De las características técnicas de los sistemas de adquisición, el rango dinámico y espectral son los que mayor relación tienen con la sensibilidad de los instrumentos Schlieren y shadowgraphy. La resolución espacial y temporal además del tiempo de obturación tienen la misma importancia que en cualquier otra aplicación de visualización de los procesos de inyección y combustión Diesel.

Ya que el contraste es especialmente importante para una buena sensibilidad de los instrumentos, un sistema de adquisición con mayor rango dinámico, tendrá un mayor número de niveles digitales y por lo tanto será capaz de detectar pequeños cambios de luminosidad. Por otro lado, los sistemas de adquisición deben poder registrar tanto la radiación externa, modificada o no, como la producida por otros procesos como la combustión. Si por ejemplo se pretende visualizar simultáneamente los procesos de evaporación y combustión Diesel, los sensores del sistema de captación deben ser capaces de registrar esta señal. Esta característica es especialmente importante en aplicaciones de color Schlieren ya que, por ejemplo, el color se suele registrar mediante la implementación de filtros antepuestos a los sensores (ver § 3.3).

5.3. Aplicación al estudio del chorro Diesel

5.3.1. Introducción

Las técnicas de Schlieren y Shadowgraph han cumplido diferentes funciones en los estudios realizados en MCIA. Entre estos está el estudio de la evaporación y combustión del carburante, la visualización de ondas de presión en el frente del chorro y la visualización de la turbulencia en la cámara de inyección. Para casi todas estas aplicaciones, los gradientes de densidad son lo suficientemente grandes para proporcionar un buen contraste por lo que ambas técnicas pueden ser fácilmente implementadas [18].

La naturaleza bifásica del chorro Diesel inyectado en condiciones evaporativas, limita el uso de las técnicas a la caracterización geométrica del chorro [12, 19]. Algunos autores, sin embargo, han conseguido medir concentraciones en chorros monofásicos; es el caso de Paulsen y Valland [4] quienes realizaron medidas de concentración en chorros gaseosos de metano y propano y Ouchi *et al.* [15] en chorros de CO₂. Por otro lado Fuller *et al.* [20] estudian los mecanismos de atomización en chorros de agua sometidos a una corriente

lateral de aire. Para este objetivo los autores utilizan la herramienta de shadowgraphy de la cual solo aportan una poca información de las características del instrumental.

En la definición de la configuración óptica, la instalación donde se lleva a cabo el estudio es quien determina la variante a utilizar: transmisión o doble paso. En el caso de transmisión, es requisito indispensable contar con dos accesos enfrentados. Como ya se ha expuesto en un capítulo previo, esta característica suele limitar el estudio de toberas de orificio único.

Con estas características es común encontrar trabajos en los cuales se visualizan diferentes fenómenos simultáneamente. Es el caso de Siebers [21], Verhoeven *et al.* [22] o Myong *et al.* [23] quienes en una maqueta de compresión rápida registran la señal de shadowgraphy a través de los accesos enfrentados y la señal de dispersión de Mie por un acceso adicional perpendicular. Por otra parte, Bougie *et al.* [24], con solo dos accesos, utilizan una lámina semitransparente (BS 50 %) para separar ambas señales.

En estudios en motores, principalmente en la visualización de toberas de múltiples orificios, no siempre se puede contar con los dos accesos, y en el caso de contar con ellos se presentan limitaciones en la definición de la configuración. Tennison *et al.* [25], por ejemplo, consiguieron visualizar varios chorros en la configuración de transmisión en toberas con un ángulo de cono pequeño (ángulo entre chorros). Otros autores como Kunkulagunta [10] o Tani *et al.* [26] consiguieron, en motores transparentes provistos con sistemas de inyección de múltiples orificios, visualizar en la variante de transmisión. Para el caso, tanto el inyector como el porta inyector ocuparon una parte importante de la imagen superponiéndose a los chorros. En todos los casos, los autores tuvieron que practicar diferentes modificaciones a sus instalaciones como fue el diseño de accesos especiales en tramos del cilindro o instalación de ventanas en la culata del motor.

Para una visualización más cómoda, otros autores implementaron la variante de doble paso, mediante el diseño de un espejo en la culata y la visualización por un único acceso en la cabeza del pistón. Para esta variante se encuentran en la literatura diferentes configuraciones según la distribución, tamaño y cantidad de elementos. Autores como Shiozaki *et al.* [16] y Yamaguchi *et al.* [17] diseñaron un complejo sistema de lente única para motor. Aunque en sus trabajos se menciona la existencia del espejo en culata, no se dan detalles de sus características. Un ejemplo de este tipo de imágenes se observa en la figura 5.8 donde se pueden apreciar las válvulas de admisión y escape.

En todos estos ejemplos de aplicación de las técnicas al estudio de los MCIA, se han utilizado diferentes configuraciones de Schlieren y shadow-

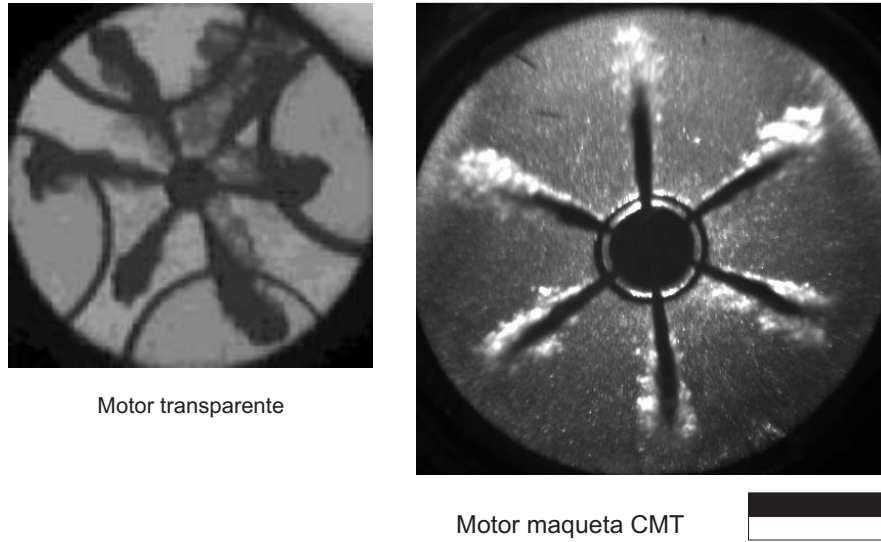


Figura 5.8: Imágenes de Schlieren en la configuración de doble paso: en motor con pistón transparente [27] y en la instalación del motor maqueta.

graphy. Para casi todos los casos, los chorros se visualizan como sombras en presencia o no del filtrado en el plano de Fourier. Esto significa que tanto la radiación dispersada por las gotas de combustible como la radiación desviada por los gradientes de densidad en el chorro, no alcanza el sensor de la cámara ya sea por la aplicación de filtros paso-bajos en el plano de Fourier, o porque la radiación sale del sistema de lentes.

Estudios preliminares para la implementación de las técnicas al estudio del chorro Diesel en el departamento mostraron, sin embargo, una tendencia más parecida a las de los chorros de aire de la figura 5.7. El ejemplo que se observa en la figura 5.8, muestra chorros axisimétricos con zonas fuertemente iluminadas aparentemente desplazadas hacia la parte superior de la imagen. Según la forma de los chorros y las observaciones realizadas para los chorros de aire, el filtrado sería aplicado con una cuchilla desde la parte superior. No obstante, como se demostrará más adelante, en la visualización de chorros Diesel, esta característica no es un indicador único de la configuración del corte. Por este motivo se observó la necesidad de realizar un estudio que permitiera determinar los parámetros que afectan la sensibilidad de la técnica en la visualización del chorro Diesel y poder así interpretar apropiadamente las imágenes.

A continuación se tratará en mayor detalle el estudio de puesta a punto de las técnicas y de sensibilidad a las condiciones experimentales tanto en la instalación como fuera de ella. Concretamente las configuraciones utilizadas

fueron la de transmisión en maquetas de inyección y motor maqueta con culata para estudio de toberas de orificio único, y de doble paso para la visualización de toberas reales de múltiples orificios en esta última instalación.

5.3.2. Estudios preliminares

Las configuraciones utilizadas en las diferentes aplicaciones de las técnicas de Shadowgraph y Schlieren al estudio del chorro Diesel, se determinaron según la disponibilidad de accesos y disposición de espacio en las instalaciones. Para todos los casos se realizaron estudios fuera de ellas que permitiera evitar tiempos muertos y determinar de esta forma los parámetros del instrumento que pudieran influir sobre los resultados. Así se pudo determinar los procedimientos de alineación y puesta a punto de las técnicas en condiciones similares a las de la instalación salvo las condiciones dentro de la cámara donde se realiza la inyección.

En la realización de los estudios, se configuró todo el instrumental de forma tal que tuviera en cuenta la disposición de espacio en la instalación. De esta forma la herramienta se soportó sobre perfiles fijos que luego fueron ubicados sobre los bancos de las instalaciones, evitando el proceso completo de montaje, quedando solo pendiente de ajuste.

Debido a la mayor complejidad de la variante de doble paso, se construyó un modelo a escala real de la culata del motor con las dimensiones internas de la cámara de combustión. El modelo se aprovisionó con una ventana de *zafiro* (igual a de la instalación) y detrás de ellas se ubicó el espejo porta inyector para conservar el equipamiento óptico del montaje. El modelo contó además con tres accesos adicionales abiertos a la atmósfera por los cuales se introdujo el chorro de aire comprimido utilizado como objeto de estudio.

5.3.2.1. Instrumental

Los esquemas generales de las dos variantes implementadas en el presente trabajo, se resumen en la figura 5.9 para transmisión y en la figura 5.10 para doble paso¹⁵. Ambas cuentan con elementos comunes como son el sistema de iluminación y condensador, la lente decolimadora L2 y el sistema de adquisición de imagen. En ambos casos la lente L3 es utilizada para adaptar el tamaño de la imagen al sensor de la cámara; esta lente en el caso de transmisión es el objetivo fotográfico. Las principales diferencias radican en el uso

¹⁵En adelante, aunque se hace referencia a la técnica de Schlieren en los esquemas de las figuras, estas sólo varían de la de Shadowgraph en la presencia del corte.

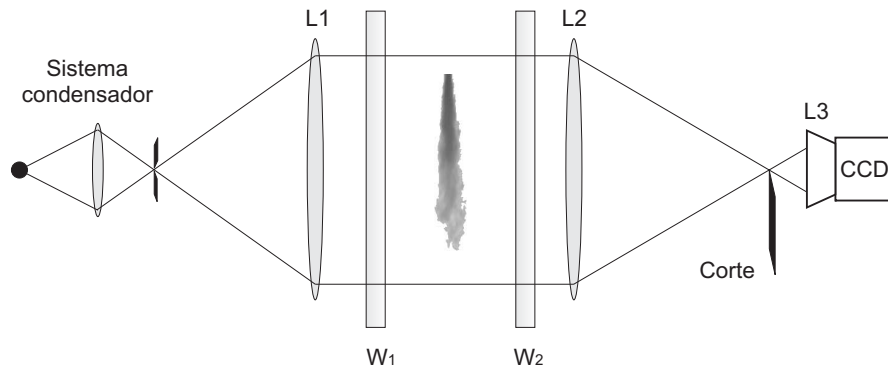


Figura 5.9: Diagrama de la configuración de Schlieren por transmisión con sistema condensador.

de la lámina semitransparente y el espejo porta inyector del sistema de doble paso, diferentes lentes de colimado L1 y el camino óptico que sigue el haz de radiación.

Fuente radiante y sistema condensador

Por su portabilidad y bajo coste, y con el objetivo de evitar patrones de interferencias asociados a la coherencia de las fuentes láser, se empleó, como sistema de iluminación, una la fuente estroboscópica de gas de Xenón de alta descarga energética (PerkinElmer modelo MVS 7010) caracterizada por generar un pulso de $20 \mu\text{s}$ de duración a un tercio de la máxima intensidad. La radiación generada por el flash se condujo por medio de una fibra óptica de forma tal que la imagen generada por el sistema condensador quedara en el plano focal de L1.

En la salida de la fibra de 7 mm de diámetro y ángulo de cono de 80° de apertura se posicionó el sistema condensador conformado por una lente biconvexa de 100 mm de distancia focal y un diafragma circular variable ubicado en el lugar donde se genera la imagen de la fuente del sistema condensador (foco de L1). Con el diafragma se filtraron los haces ubicados en el centro del haz y se eliminaron los de la periferia, de menor intensidad.

En muchas de las aplicaciones, se observó un exceso de radiación que fue controlado mediante el uso de filtros neutros con diferentes grados de densidad óptica OD. Como ejemplo, en estudios de evaporación en la variante de doble paso se utilizaron filtros con valores OD entre 2 y 3 (1 y 0.1% de transmitancia, respectivamente) según la cantidad de radiación que llegara al sensor de la cámara. Este valor de radiación varía según se vieran afectadas

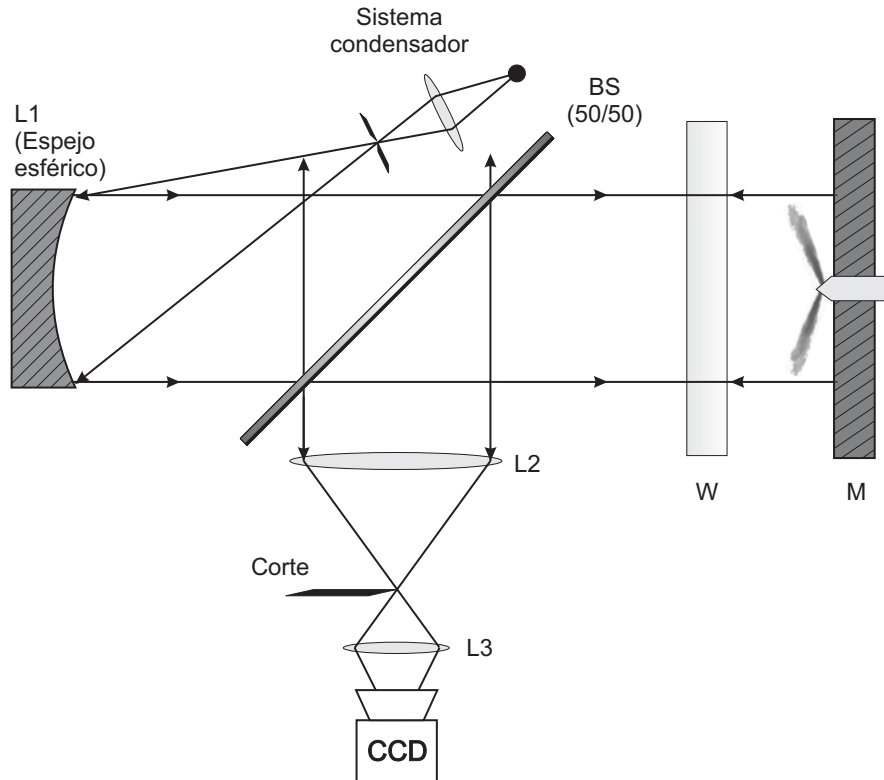


Figura 5.10: Montaje de Schlieren de doble paso con espejo esférico y sistema condensador.

por ensuciamiento y/o desgaste, las propiedades de transmitancia del acceso óptico y de reflexión del espejo porta-inyector.

Lentes de colimado y decolimado

Por flexibilidad y simplicidad, las configuraciones previas se diseñaron con un sistema doble de lentes: una para el colimado y otra para el decolimado¹⁶.

En la variante de transmisión, se utilizaron dos lentes plano-convexas de cuarzo de 60 mm de diámetro y de 250 y 350 mm de focal para el colimado y el enfoque. Con estas características se construyó un sistema compacto y liviano aunque con una profundidad de enfoque pequeña. No obstante, no

¹⁶En ocasiones se hace referencia a la lente de decolimado como de 'enfoque' ya que es la encargada de enfocar el haz de rayos paralelos y formar la transformada del objeto en el plano de Fourier.

se observaron inconvenientes significativos por la accesibilidad al chorro en instalaciones con múltiples accesos.

En contraposición, en la variante de doble paso se observaron mayores dificultades de acceso por lo que fue necesario ampliar la profundidad de campo y alejar el área de prueba de L1. Para el cumplimiento de este objetivo, se substituyó la lente colimadora de 250 mm de focal por un espejo esférico con recubrimiento de aluminio de 152 mm de diámetro y focal de 609 mm. Con estas dimensiones se consiguió además aumentar el tamaño del haz colimado, que como se verá más adelante, era necesario para modificar el eje óptico del sistema sin modificar la posición de los componentes restantes del instrumento.

Adquisición y enfoque

El registro de las imágenes se llevó a cabo con la cámara CCD SensiCam de la tabla 3.1. El sistema de enfoque se configuró con la lente decolimadora L2 y una o dos lentes adicionales, que para el caso de transmisión fue el objetivo fotográfico comercial de focal fija de 60 mm. En el caso de doble paso, se requirió el uso de una lente adicional L3 de 350 mm de focal, por razones que se comentarán más adelante. En ambos casos, la apertura del objetivo fue máxima para evitar que el iris actuara de diafragma de campo.

Para un máximo aprovechamiento de la resolución espacial del sensor, se estimó la posición, a partir de L2, tanto de la cámara, con su respectivo objetivo, como de L3, con las ecuaciones para lentes delgadas. Éstas relacionan tanto la posición como el tamaño de la imagen de un objeto con la distancia focal de la lente. Estas ecuaciones son:

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} \quad (5.3)$$

$$\frac{y'}{a'} = \frac{y}{a} \quad (5.4)$$

donde f' es la distancia entre el plano de la lente y el punto focal donde converge la radiación (positiva para lentes convergentes y negativa para lentes divergentes), a la distancia conocida de la lente al objeto visualizado (generalmente con valor negativo) y a' la distancia entre la lente y la imagen enfocada del objeto (negativa si la imagen es virtual y positiva si, por el contrario, es real). Las dimensiones del objeto y su imagen serán y e y' , respectivamente.

El sistema de lentes se constituyó teniendo en cuenta, además:

- El tamaño del objeto y que es el diámetro útil del haz, determinado, en el mejor de los casos, por el tamaño de las ventanas de acceso al motor.
- La distancia a entre L2 y los chorros, limitada por el espacio disponible en la instalación.
- Las dimensiones de la CCD que determinan el valor máximo posible de y' para la imagen generada por el sistema de lentes.
- El ángulo del haz radiante que emerge de L2, que es función de la focal de la lente, y que limita el posicionamiento del conjunto cámara objetivo. Dicho de otra manera, si la cámara se aleja del plano focal, parte de la radiación del haz emergente no será registrada por el objetivo fotográfico.

Debido a la distancia menor entre L2 y el objeto, en la variante de transmisión, la imagen real de la lente se forma a una distancia muy alejada de su plano focal (ver ecuación 5.3). De esta manera, fue posible ubicar el objetivo fotográfico, con un rango de enfoque variable entre 50 mm y el infinito, en una posición apropiada, y enfocar la imagen formada por L2 con máximo aprovechamiento de la CCD. En la variante de doble paso, la distancia entre L2 y el objeto es mayor, por lo que la imagen de L2 se forma muy cerca de la posición que tendría el objetivo fotográfico creando problemas de enfoque. Para poder posicionar la cámara y obtener el máximo aprovechamiento de las dimensiones del sensor, se corrigió ángulo del haz emergente de L2 con el uso de L3.

Sistema de corte

La máscara de corte se diseñó mediante la combinación de finas cuchillas que fueron posicionadas en el plano focal de la lente L2. Para mayor precisión, la máscara de corte se soportó sobre un pequeño sistema de coordenadas con los tres grados de libertad lineales.

Lámina semitransparente (BS)

En la variante de doble paso, la lámina semitransparente o beam splitter tiene como tarea la separación de la radiación incidente y la emergente, transmitiendo una parte de la radiación mientras el resto es reflejada. De estos sistemas se pueden encontrar desde finas películas de nitrocelulosa de solo $2 \mu\text{m}$ de espesor hasta láminas de vidrio de diversos espesores.

Debido a su delgadez, las películas de nitrocelulosa son extremadamente frágiles y sensibles: cualquier corriente de aire presente en la instalación, causa deformaciones en las imágenes. No obstante, esta característica permite evitar la aparición de doble imagen que se observa en láminas convencionales de vidrio por reflejos en sus caras.

En la configuración para la visualización de las imágenes de chorros del presente trabajo, se utilizó una lámina de vidrio de 3 mm de espesor provista con un recubrimiento especial en una de las caras, minimizando así el efecto de la doble imagen. Se omitió el uso de las láminas de nitrocelulosa por su fragilidad y por las deformaciones asociadas a la vibración por la ventilación de la sala.

Espejo porta-inyector

En la configuración de doble paso, la calidad de la imagen depende en gran medida de la calidad del espejo utilizado. Un espejo con buenas características generará una imagen con un fondo homogéneo en ausencia de gradientes de índice de refracción. No obstante, los espejos convencionales difícilmente pueden cumplir las características de resistencia mecánica y térmica requeridas en las condiciones de motor. Para este tipo de aplicaciones se suele recurrir a espejos fabricados en materiales metálicos donde la superficie especular se consigue mediante pulido con acabado espejo.

Buscando un espejo óptimo, se experimentó con tres diferentes materiales en la fabricación del soporte del inyector: acero al carbono, acero inoxidable comercial y acero inoxidable con alto contenido en cromo y bajo contenido en escoria utilizado en aplicaciones ópticas. A los dos primeros se les aplicó un pulido mecánico con polvo de diamante de 2 μm de rugosidad máxima. Este tratamiento dio como resultados una superficie con cierto nivel de granulado especialmente importante en el acero inoxidable de mayor dureza. La calidad de la superficie especular se mejoró con el acero óptico gracias a las propiedades del material que facilitó la aplicación de pulido láser. Dado que este material es considerablemente más costoso que los anteriores, los espejos se fabricaron como láminas de 15 mm de espesor que fueron ubicadas sobre el porta-inyector modificado.

En la figura 5.11 (a), se presenta un ejemplo del granulado observado en el espejo de acero al carbono. De la misma manera, los frecuentes procesos de repulido con métodos mecánicos, ocasionaron pérdidas de material que afectaron los bordes del espejo. En la imagen, el orificio del inyector parece mayor al observado en la segunda imagen de la figura que corresponde al

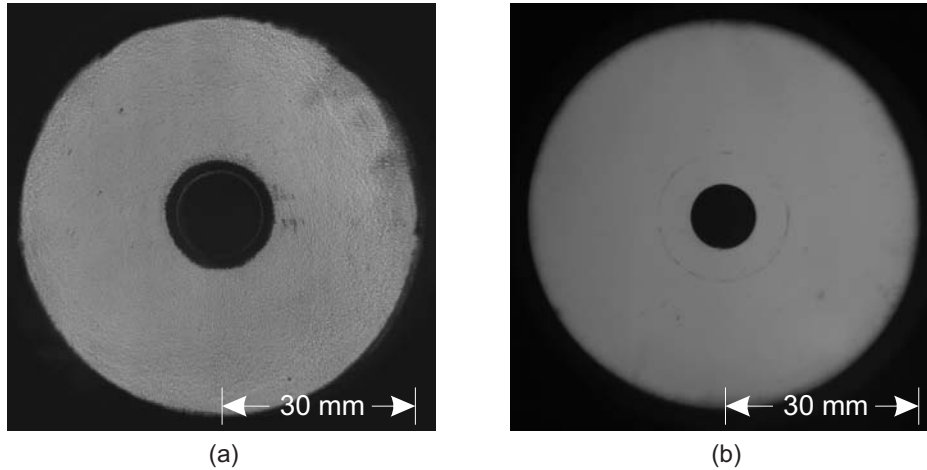


Figura 5.11: Ejemplo de fondos para espejos porta-inyector fabricados en acero al carbono con pulido mecánico con polvo de diamante (a) y acero inoxidable alto en cromo tratado con pulido láser (b).

espejo con el acero óptico. De igual forma, se puede apreciar las diferencias en el fondo siendo más homogéneo para el segundo caso.

En condiciones de motor, la deposición de combustible y aceite lubricante crea una fina capa que, aunque afecta negativamente a la reflectividad del espejo, contribuye a homogeneizar el fondo de la imagen haciendo menos perceptibles los efectos asociados a la rugosidad de la superficie. No obstante, ésta alcanza rápidamente un valor crítico que obliga al desmonte y limpieza frecuente del espejo.

5.3.2.2. Procedimiento de alineación y enfoque

Alineación

El procedimiento de alineación del instrumento se definió fuera de la instalación experimental debido al alto tiempo requerido para su puesta a punto. En primer lugar, se determinó el eje óptico de los componentes mediante el uso de un haz colimado de pequeñas dimensiones, concretamente el haz de un diodo láser. Gracias al diámetro del haz del diodo, si la señal láser atraviesa el medio por el centro del sistema de lentes, éste no sufre modificaciones importantes en su forma y tamaño. Por el contrario, pequeños desalineamientos de cualquiera de las lentes se hacen patentes en un desplazamiento sensible del haz proyectado a larga distancia.

Los primeros elementos en ser posicionados han sido los de la iluminación y el sistema condensador. Aunque en los ensayos se utilizó la fuente estroboscópica como se ha comentado anteriormente, el proceso de montaje se llevó a cabo conectando la fibra óptica a una fuente de luz continua. Con ésta y en ausencia de ruido radiante externo, fue posible identificar reflejos y recortes del haz en su paso por los diferentes componentes del instrumento. Para la instalación de la fibra (en realidad un haz de fibras incoherente), se fabricó un soporte especial que permitiera su desplazamiento y rotación. En la punta, se ubicó el sistema condensador que permitiera variar fácilmente la posición de la lente biconvexa y de esta manera modificar el tamaño y forma del haz. El diafragma de corte del sistema condensador se ubicó donde se forma la imagen del haz de fibras por la lente condensadora.

La lente colimadora L1 se posiciona a una distancia igual a su focal desde la imagen del sistema condensador. Si la posición es correcta, la radiación después de la lente, se aproximará a un haz de rayos paralelos. El paralelismo puede comprobarse o ajustarse observando el tamaño del haz a distintas distancias sobre una pantalla con una escala graduada.

La lente decolimadora o de enfoque L2, se ubica a una distancia ligeramente mayor a la de su focal después del plano de prueba. De esta forma se tendrá el objeto de estudio dentro de la zona de ensayo, mientras la lente proyectará una imagen real a una distancia cercana al infinito. Con estas condiciones será fácil obtener una imagen enfocada por el objetivo fotográfico con máximo aprovechamiento del sensor de la cámara. En la variante de doble paso, por los condicionantes de la instalación, la distancia entre el objeto y L2 es necesariamente mayor por lo que para conseguir un buen enfoque con resolución aceptable fue necesario introducir la tercera lente L3.

La radiación proyectada por L2, se enfoca en un punto en el plano focal de la lente. Si el sistema está correctamente alineado y posicionado, en el plano focal de L2 se formará una imagen de la fuente. Es en este plano donde se posiciona la máscara para la realización del filtrado espacial. Si el sistema de filtros no se ubica correctamente, la uniformidad del fondo podría verse comprometida además del correcto funcionamiento del instrumento.

Para asegurar que toda la información llegue al sensor de la cámara y que el iris del objetivo no actúe como diafragma de campo, es necesario ubicar el conjunto (cámara-objetivo), para el caso de transmisión, muy próximo al plano focal imagen, y para el de doble paso, ajustado a L3. En el caso de shadowgraphy, al no realizarse filtrado de Fourier, puede colocarse incluso antes del plano focal imagen de L2. La posición del conjunto, varía según el rango de enfoque del objetivo fotográfico y el tamaño del sensor de la cámara.

En la variante de doble paso, se debe garantizar la perpendicularidad entre el espejo y el haz colimado con el fin de evitar reflejos en las paredes interiores de la cámara de combustión. Aunque en condiciones ideales, se puede garantizar unas buenas características de perpendicularidad y reflexión, en condiciones de motor la posición relativa del haz con el plano del espejo se ve comprometida por las vibraciones propias de la instalación. Para minimizar este efecto, se hace un último ajuste con el motor en marcha considerando que la adquisición se realizará en PMS o cerca de él. Ya que el espejo se encuentra instalado en la cámara de combustión del motor e independiente del sistema de coordenadas donde se encuentra el instrumental óptico, la distribución de este último se diseña de forma tal que el espejo quede en una posición cercana al plano de prueba.

La lámina semitransparente se ubica en el camino óptico del haz formando un ángulo aproximado de 45° . Aunque con este valor la superficie de BS en contacto con los haces incidente y emergente es la misma, pequeñas variaciones permitieron una mejor distribución del instrumental óptico. La lámina se posicionó de forma tal que la superficie recubierta fuera la primera en entrar en contacto con la radiación reflejada por el espejo porta-inyector.

Enfoque

En la evaluación del enfoque en la zona de prueba del instrumento, se encontró un problema añadido debido a la dificultad de encontrar un objeto que proporcionara un grado de nitidez suficiente para emitir sobre él un juicio acertado de su calidad. Ya que el proceso en muchas ocasiones queda al criterio de la persona que realiza el trabajo de experimentación, se definió una rutina clara y precisa mediante la colocación de un cilindro de cristal en el lugar donde se asume se encontrará el chorro o chorros Diesel. El cilindro actúa como lente concentrando la radiación del haz de rayos paralelos en su eje por lo que la imagen, como se observa en la figura 5.12, es una fina línea brillante sobre un fondo oscuro con la geometría del cilindro. Si el cilindro no está bien enfocado, la línea se verá en la imagen más gruesa y difusa, o incluso dejará de ser visible.

5.3.3. Estudios en la configuración de transmisión

La variante de transmisión se empleó en el estudio de chorros Diesel inyectados con toberas de orificio único en instalaciones provistas con al menos dos accesos ópticos enfrentados: maquetas isoterma y motor maqueta con culatas

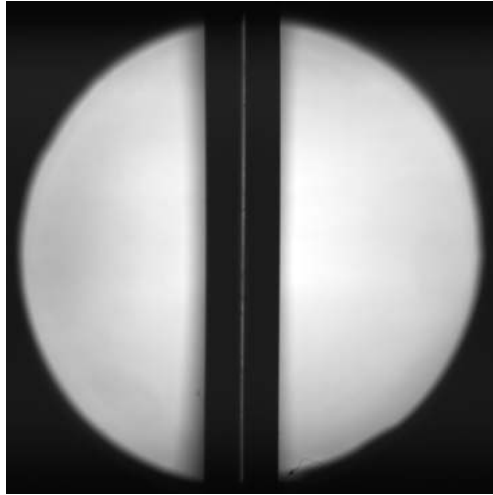


Figura 5.12: Imagen del cilindro de cristal utilizado en la evaluación del enfoque de la zona de prueba del instrumento Schlieren/shadowgraphy.

de tres accesos (ver § 3.4). Concretamente se realizaron dos tipos de estudio: visualización de las ondas de presión generadas por el frente del chorro en atmósfera isoterma e inerte con Schlieren, y estudios de chorro evaporativo en condiciones tanto inertes como reactivas con ambas técnicas.

5.3.3.1. Visualización de ondas de presión

El estudio del desarrollo del chorro Diesel ha sido uno de los principales objetivos de la implementación de técnicas de visualización. No obstante, como se observaba en el capítulo anterior, la obtención de imágenes de chorros en los primeros instantes de tiempo suele ser una tarea complicada debido a la sensibilidad del instrumental y la gran velocidad alcanzada por las gotas de combustible en las proximidades del orificio. Así, si un chorro cuyo frente penetra en la cámara a 300 m/s, avanzará 6 mm en el tiempo de exposición de 20 μ s típico de la visualización de chorros con las metodologías descritas en el capítulo 4.

Las actuales tendencias en el desarrollo de sistemas de inyección, muestran un aumento considerable en la velocidad con la que penetra el chorro en la cámara de combustión. Estudios de penetración realizados por diferentes investigadores han mostrado dos instantes de tiempo en los cuales el chorro Diesel primero penetra con velocidad máxima constante para luego desacelerarse al interactuar con el gas ambiente [28].

El aumento de la velocidad máxima, manteniendo constantes el resto de condiciones, mejora el proceso de atomización y por ende el de combustión. Nakahira *et al.* [29], por ejemplo, concluyen que los mecanismos de generación de las ondas de presión están relacionadas con los mecanismos de atomización. Así, un estudio de la generación de las ondas contribuiría a la comprensión de los fenómenos físicos presentes en los primeros instantes de la inyección. Según afirmaciones de Milton y Pianthong [30], la presencia de ondas de presión en chorros supersónicos mejora las condiciones termodinámicas instantáneas alrededor del chorro mejorando la eficiencia del proceso.

El objetivo de este estudio, es por lo tanto, evaluar los alcances y la viabilidad de la visualización de las ondas de presión y de la penetración del chorro en los primeros instantes de la inyección con las técnicas de Schlieren en la configuración de transmisión utilizando tiempos de exposición menores a los utilizados con otras metodologías.

a. Metodología

Las ondas se producen por los gradientes de presión generados por el chorro de combustible cuando entran en contacto con el gas presente en la cámara de inyección. Éstas se propagan a una velocidad igual a la velocidad del sonido a en el medio, que se define como la relación:

$$a = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (5.5)$$

donde γ es el coeficiente adiabático, R la constante universal de los gases, T la temperatura absoluta del medio y M la masa molar o peso molecular del gas.

De la ecuación 5.5 se observa que un objeto que se desplaza en un medio gaseoso con un peso molecular alto, alcanzará antes el régimen supersónico que si por el contrario viajara en un gas con M menor. Por este motivo, la inyección, y por tanto la visualización, se realizó en la maqueta de chorro libre isoterma de circuito cerrado de hexafluoruro de azufre (SF_6) [31–33] (ver § 3.4). El peso molecular de este gas ($M=146.05$ kg/kmol), bastante mayor al del aire o el nitrógeno, permite alcanzar densidades del orden de 30 kg/m³ con presiones de 0.5 MPa. y temperatura ambiente. En él, el sonido viaja a una velocidad $a = 135.3$ m/s a 21 °C. En el aire o el nitrógeno a alcanza valores por encima de los 340 m/s en las mismas condiciones.

Para evaluar el alcance de la metodología, se elaboro una sencilla matriz de ensayos con una tobera convergente de un solo orificio de diámetro $d = 156$ μm

y $K_{factor} = 1.8$. La inyección se realizó para tres diferentes presiones de inyección de 30, 80 y 130 MPa en una atmósfera de densidad $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$. Para cada condición de ensayo, se registraron cinco imágenes por instante de tiempo ASOI desde el inicio de la inyección hasta el final del aporte de combustible, con avances de $10 \mu\text{s}$.

Gracias a la mayor sensibilidad del instrumento Schlieren, la radiación generada por la fuente estroboscópica fue suficiente para poder registrar imágenes con tiempos de obturación de 200 ns. Muy inferior a los tiempos de exposición empleados en los estudios de visualización convencional del chorro líquido, donde es la duración del pulso de descarga del flash ($20 \mu\text{s}$) quien impone el tiempo de exposición de la imagen.

Con el sistema condensador se obtuvo una fuente de 1 mm de diámetro suficiente para observar las ondas de presión sin que se registraran interferencias por las imperfecciones de los accesos. El sistema de lentes lo conformaron las lentes plano-convexas de 250 mm y 350 mm de focal y 60 mm de diámetro para los procesos de colimado y enfoque respectivamente. El diámetro de las lentes, limitó el campo de visualización por lo que se requirió realizar un desplazamiento controlado del instrumento para barrer todo el campo. Este detalle se puede observar en la figura 5.13 donde el campo de visión esta desplazado para (c) unos milímetros a la derecha.

A diferencia de otros estudios, en la visualización de ondas de presión se empleó un objetivo con focal $f = 25 \text{ mm}$, suficiente para tener una imagen con buena resolución espacial (máximo aprovechamiento de la CCD de la cámara de 1280×1024 píxeles).

El filtrado espacial se realizó verticalmente debido a que el chorro penetra horizontalmente en la cámara de inyección. Una deficiente sensibilización del instrumento ocasionaría que no fuera posible el registro de las ondas; en contraposición un exceso de ella, aumentaría la presencia de las imperfecciones de los accesos o, como exponen MacPhee *et al.* [13], permitiría observar los rebotes de las ondas de presión, en el caso que estas se dieran.

b. Resultados

El chorro Diesel, al salir por el orificio de la tobera, entra en contacto con el gas presente dentro de la cámara de inyección creando gradientes de presión entre el frente del chorro y el gas que lo rodea [34]. Estas diferencias generan ondas circulares instantáneas cuyo frente se propaga a la velocidad del sonido a . Conforme el chorro penetra, se van formando nuevas ondas, mientras que

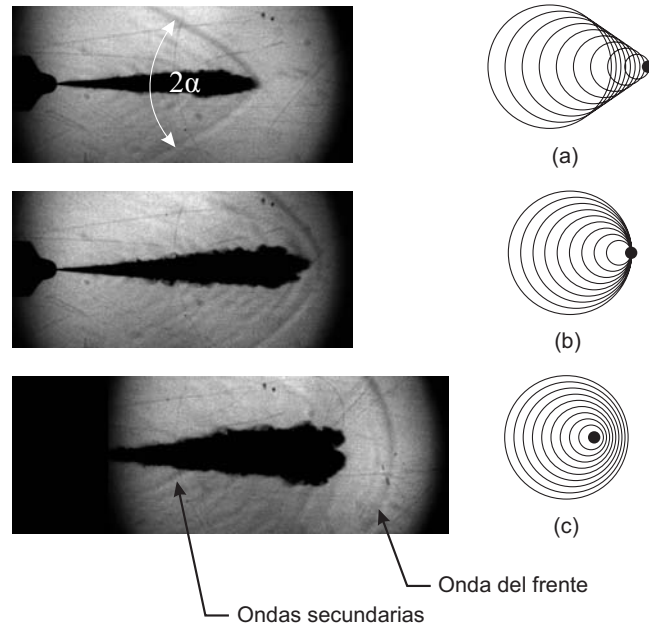


Figura 5.13: Comportamiento de las ondas de presión en función de la velocidad relativa de la fuente generadora (chorro Diesel) y el medio que lo rodea. Las imágenes corresponden a 120, 170 y 240 μs ASOI (supersónico, transónico y subsónico, respectivamente), inyectando con $P_{inj} = 130 \text{ MPa}$ en atmósfera de SF_6 con densidad $\rho = 20 \text{ kg/m}^3$.

las primeras continúan avanzando. La figura 5.13 muestra un esquema de la formación de ondas y como se comportan a medida que el chorro se desarrolla.

En la figura se presentan los tres posibles casos (en tres instantes de tiempo después del inicio de inyección) que se pueden dar en la visualización de las ondas de presión, y que corresponden a:

- (a). **Chorro en régimen supersónico:** El frente del chorro penetrará en la cámara más rápido que la velocidad del sonido. Las ondas generadas, al ser mayor la distancia entre sus centros, formarán un ‘cono’ y el ángulo de este ‘cono’ permitirá determinar la velocidad del frente del chorro como la relación:

$$\sin(\alpha) = \frac{a}{c} \quad (5.6)$$

donde α es el semi-ángulo del cono formado por las *ondas de presión*

y a y c serán la velocidad del sonido en el medio donde se inyecta y la velocidad del objeto en movimiento causante de las *ondas de presión* que en nuestro caso es el chorro Diesel.

- (b). **Chorro en transición o transónico:** Este caso se da cuando el frente del chorro disminuye su velocidad y penetra en el gas a la misma velocidad de las ondas.
- (c). **Chorro en régimen subsónico:** Cuando la velocidad del frente del chorro Diesel es inferior a la velocidad del sonido en el medio donde se inyecta, los frentes de las ondas se alejarán cada vez más del frente del chorro en todas las direcciones.

Además de las ondas del frente, se observan en la periferia del chorro ondas con menor contraste. Estas ondas se generan por las pequeñas imperfecciones en la conicidad del chorro que entran en contacto con la atmósfera. No obstante estas ondas secundarias se generan con gradientes de presión inferiores a los del frente del chorro, por lo que para su estudio se requiere una mayor sensibilidad del instrumento.

Con las imágenes obtenidas se realizaron las medidas de penetración para el frente del chorro líquido y el frente de las ondas de presión. Las medidas de penetración de chorro líquido, fueron realizadas mediante el uso de los programas de procesamiento de imágenes de visualización con iluminación trasera difusa [35, 36], utilizando el algoritmo LRT para distribuciones gaussianas descrito en el capítulo 4.

En la figura 5.14 se muestran los resultados de penetración para el punto de mayor presión de inyección de 130 MPa. En la figura se observa como tanto el chorro como el frente de las ondas penetran solidarias en la cámara de inyección cuando el chorro se encuentra en régimen supersónico. Una vez se produce la desaceleración del chorro y éste pasa a régimen subsónico, las ondas de presión se alejan del frente del chorro a una velocidad constante igual a la del sonido.

Esta afirmación se confirma haciendo un ajuste lineal en la gráfica de penetración del frente de las ondas cuando el chorro alcanza el régimen subsónico. La medida da como resultado un valor cercano a los 135.3 m/s calculados, para el SF₆, con la ecuación 5.5 a 21°C. La diferencia observada de 0.4 m/s se puede deber a la medida de la distancia y posterior estimación de la recta de regresión.

De igual forma, un ajuste lineal de los puntos en el período comprendido entre 35 y 80 μ s ASOI, da como resultado la velocidad del chorro en régimen

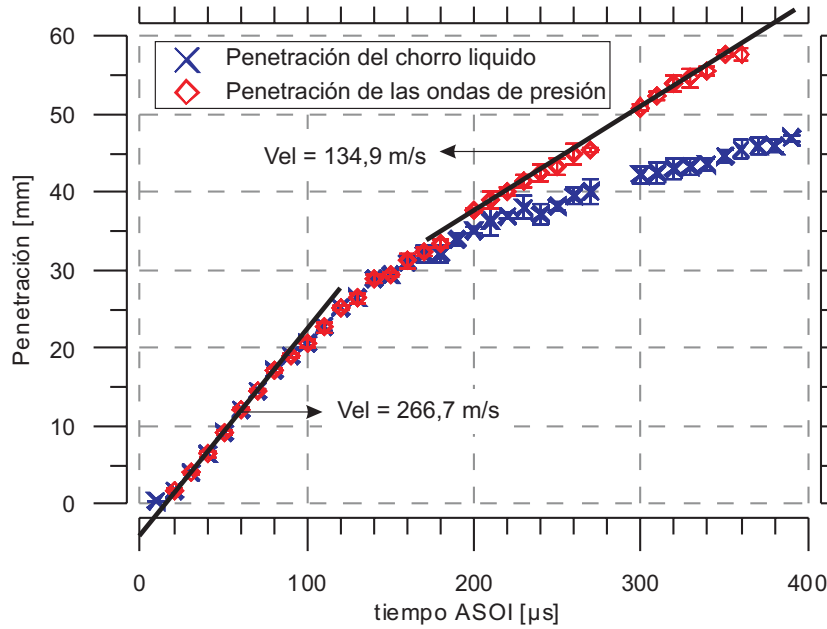


Figura 5.14: Comparación entre la penetración del chorro líquido y la penetración de las ondas de presión inyectando a 130 MPa. Ambas gráficas avanzan solidarias hasta el momento en que el chorro pasa a régimen subsónico.

supersónico. Esta medida se valida con la medida del semi-ángulo de cono α formado por las ondas de presión para estos instantes de tiempo. Con un valor medio calculado de las imágenes de $2\alpha = 60^\circ$, se calcula con la ecuación 5.6 la velocidad del chorro supersónico como $c = 268$ m/s. Las diferencias observadas entre el valor calculado con la ecuación y el valor obtenido de la gráfica se deberán a errores en la medida de α .

Un comportamiento similar al anterior se observó para los puntos en los cuales se inyectó a 80 MPa como se puede observar en la figura 5.15. No obstante, para la presión más baja de 30 MPa, el chorro no supera en ningún instante la velocidad del sonido, alcanzando una velocidad máxima aproximada de solo 95 m/s. Con esta velocidad, los frentes de onda se alejan rápidamente del frente del chorro dificultando su registro.

5.3.3.2. Chorro evaporativo

En condiciones de motor las técnicas de Schlieren y Shadowgraph se han implementado para el estudio de la evolución espacial del chorro Diesel. A diferencia de las imágenes de ondas de presión donde la inyección se lleva a

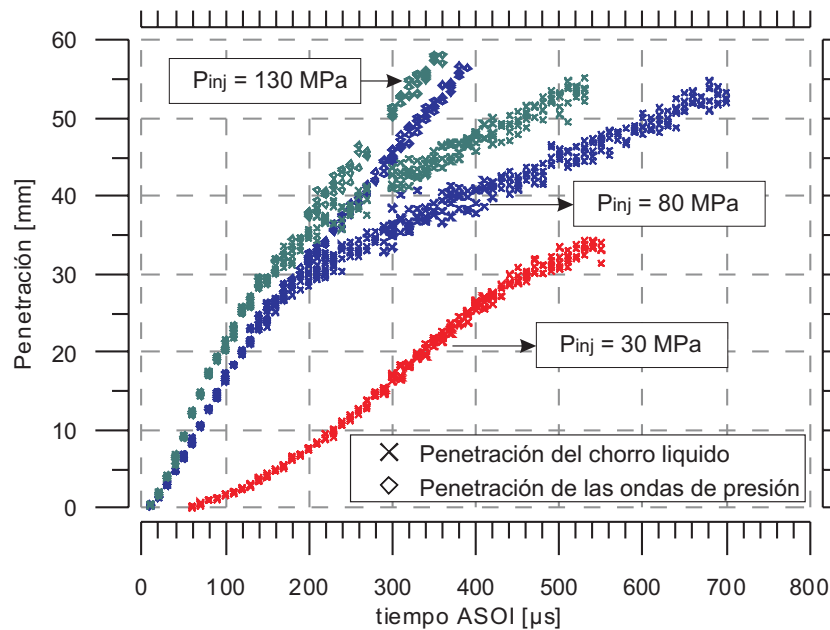


Figura 5.15: Comparación entre la penetración del chorro líquido y la penetración de las ondas de presión para los puntos de 30, 80 y 130 MPa.

cabo en un gas estacionario, en motor, esta se desarrolla en una atmósfera turbulenta con importantes gradientes de temperatura y presión. Además, según el gas atmosférico, el proceso puede ser reactivo si se inyecta en aire o inerte en nitrógeno.

En estas condiciones, las imágenes están formadas por zonas luminosas con diferentes niveles de intensidad, que corresponde a la radiación refractada o no, que no haya sido filtrada en el plano de Fourier y la radiación térmica de la llama, cuando esta se presenta. Por el contrario, la ausencia de radiación observada como sombras, tiene diferentes orígenes:

- La radiación refractada que sale del sistema de lentes.
- La radiación filtrada en el plano de Fourier.
- La radiación debida a la dispersión de Mie provocada por las gotas de combustible.

Las fuentes generadoras de las heterogeneidades serán en ambiente inerte, la coexistencia de las fases líquida y vapor del combustible y los gradientes

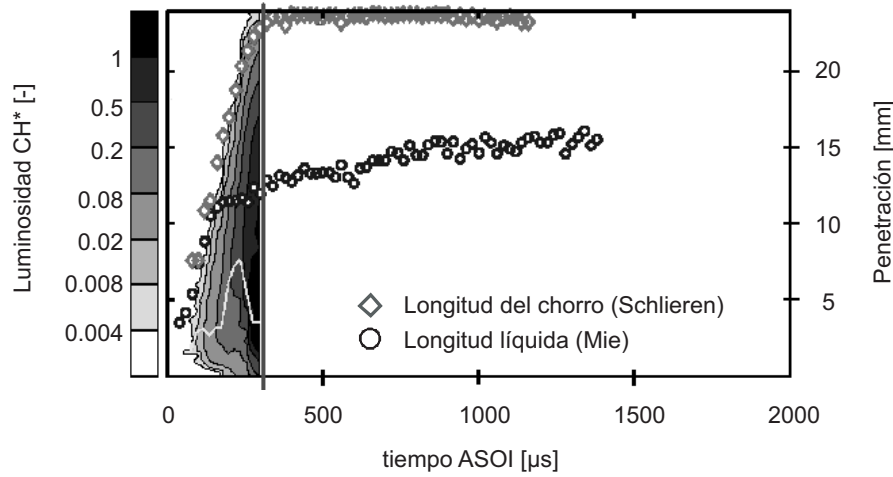


Figura 5.16: Superposición de las medidas de penetración líquido-vapor a la señal de radiación quimioluminiscente hasta la aparición de la radiación incandescente.

de temperatura y presión del gas dentro de la cámara de combustión. Cuando la inyección se lleva a cabo en una atmósfera reactiva, se presentan además zonas de reacción que modifican igualmente las características de la radiación del haz colimado.

Aunque las técnicas, como se verá más adelante, no discriminan entre fases, su uso permite determinar la frontera del chorro (en este caso gaseoso), con el mismo procedimiento que se usó para la fase líquida en el capítulo anterior. Como se puede observar en la gráfica de la figura 5.16, el chorro en fase líquida alcanza su longitud máxima y se estabiliza, aunque siga penetrando en fase vapor. Con la visualización de la radiación de quimioluminiscencia y la radiación de incandescencia natural del hollín, que se tratarán en el próximo capítulo, se consigue registrar la frontera de reacción. Superponiendo tanto las medidas de penetración, como los límites de radiación de quimioluminiscencia, se observa por tanto como desde que se presentan las primeras reacciones la medida de penetración Schlieren sigue el mismo camino hasta el límite de los accesos.

a. Instalación y configuración

La visualización en la variante de transmisión se llevó a cabo en la instalación del motor maqueta provista con la culata para el estudio de toberas de orificio único (ver § 3.4). El volumen de la cámara de combustión, está determinado por la geometría interna de la culata de 45 mm diámetro y de

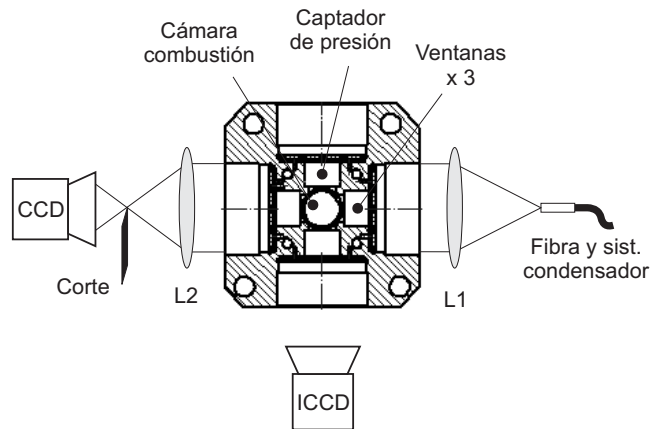


Figura 5.17: Vista superior de la culata de 3 accesos para estudios de toberas de orificio único en motor maqueta con la disposición del instrumental óptico de Schlieren.

91 mm de altura. La culata cuenta con cinco accesos al interior de la cámara de combustión, cuatro laterales y uno en la parte superior, para la instalación del inyector. El gas se admite en la cámara de combustión por la parte inferior, gracias a la compresión del pistón del motor mono-cilíndrico.

De los cuatro accesos laterales, uno de ellos se empleó para la instalación del captador de presión. Los accesos restantes se destinaron a la instalación de tres ventanas elípticas de 81 mm de longitud y 30 mm de anchura efectiva. Las ventanas enfrentadas permitieron la visualización Schlieren/shadowgraphy en la variante de transmisión, mientras que la tercera se empleó para el registro de la radiación de dispersión de Mie del haz colimado. La distribución del instrumental óptico, discutido en la sección *Estudios Preliminares*, se puede observar en la figura 5.17. Debido a la configuración de la iluminación, la señal de Mie es muy débil por lo que fue necesario registrarla con la cámara intensificada.

b. Características de las imágenes

Una característica importante observada en las imágenes de Schlieren y shadowgraphy en motor es la presencia significativa de ruido de fondo [37]. Sus orígenes están en el degradado de las ventanas por deposición de combustible y productos finales de la combustión como el hollín, y por la presencia de turbulencia y la consiguiente variación en el índice de refracción por gradientes de temperatura y densidad en el gas.

Aunque en una imagen final cuesta identificar estas fuentes de ruido, un

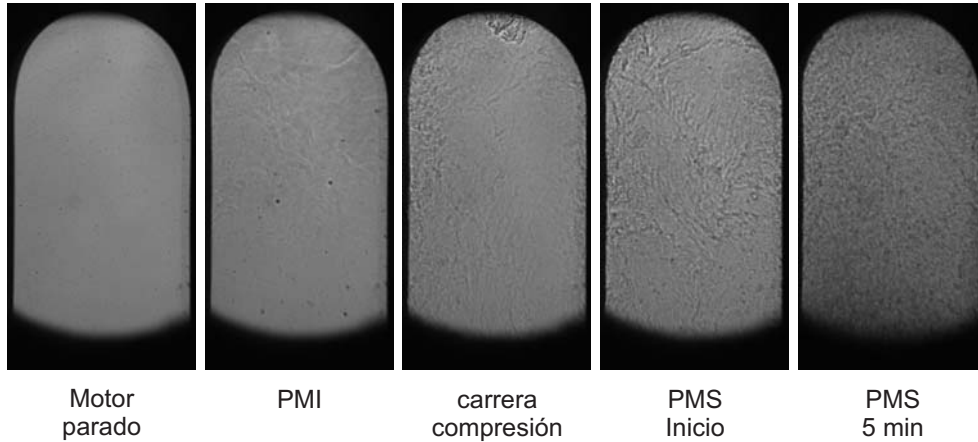


Figura 5.18: Imágenes sin inyección con motor parado, diferentes posiciones del pistón justo después del arranque y en PMS transcurridos 5 minutos.

seguimiento como el que se presenta en la figura 5.18 sirve para demostrar su presencia. La composición de la figura comienza con una imagen adquirida con motor parado y con las ventanas perfectamente limpias. En estas condiciones el fondo es homogéneo, similar al observado en los estudios preliminares fuera de motor o en maquetas isoterma. Una vez se inicia el arranque del motor, tres imágenes adquiridas para diferentes posiciones del pistón, muestran un aumento del ruido causado por la turbulencia del gas y por la presencia de gradientes termodinámicos. Estas variaciones aparecen cuando entran en contacto el gas remanente de la cámara de combustión con el de un nuevo ciclo de motor. Pasados unos minutos, la transmitancia de los accesos disminuye por ensuciamiento, disminuyendo el nivel de intensidad general de las imágenes.

Iniciado el proceso de inyección en atmósfera inerte, además del ruido, se observa el chorro bifásico como se presenta en la imágenes de la izquierda de la figura 5.19. Aunque se pueda afirmar que en el eje del chorro y cerca del orificio de la tobera el chorro estará conformado por gotas de combustible y en el frente este combustible ya se habrá evaporado, con las técnicas no es posible por lo tanto determinar una frontera clara entre fases debido a que la visualización es integral en el eje de propagación del haz colimado.

En atmósfera reactiva aparecen otros elementos en la imagen como la radiación del hollín incandescente y la presencia de gases calientes y productos intermedios y finales. Al igual que en el caso bifásico, no es posible la discriminación de los diferentes fenómenos visualizados, sino que se observa la evolución integral del chorro de combustible.

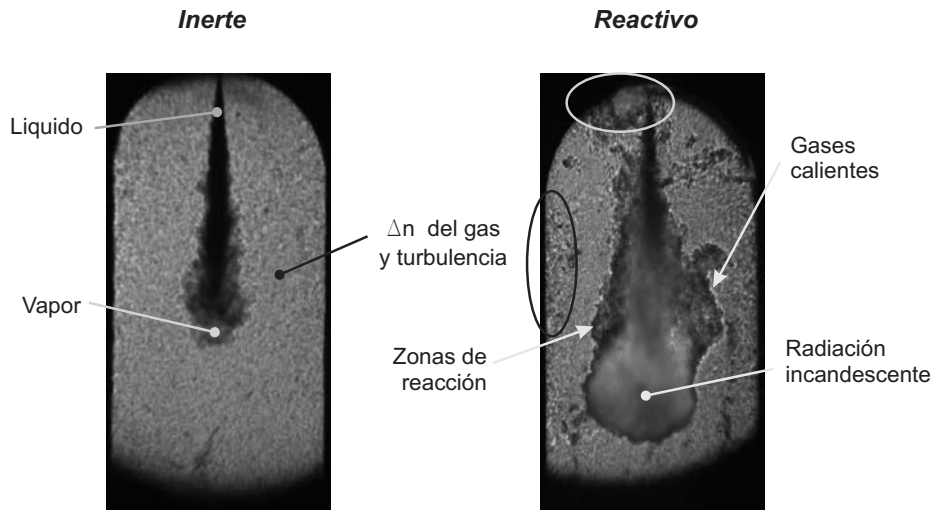


Figura 5.19: Imágenes características de chorro Diesel en motor en atmósfera reactiva o inerte, adquiridas con la variante de transmisión.

c. Sensibilidad

El ruido de fondo fue un factor predominante en la definición de la sensibilidad del instrumento. Un sistema más sensible, aumenta el contraste entre el fondo y las fuentes generadoras de las heterogeneidades, lo que dificulta el posterior análisis de las imágenes. El análisis de sensibilidad del instrumento se realizó tanto en la configuración del sistema condensador, y por lo tanto en la profundidad de campo, como en el filtrado espacial en el plano de Fourier.

Para el sistema condensador se evaluaron diferentes configuraciones de tamaño y forma de la fuente de iluminación. Como ejemplo, en la figura 5.20 se pueden apreciar imágenes con dos diferentes configuraciones de diafragma similar a las configuraciones para chorro de aire comprimido de la figura 5.6. Concretamente, para el caso (a) se empleó un diafragma de 3 mm de diámetro mientras que para (b) el tamaño filtrado de la fuente fue de solo 500 μm con geometría igualmente circular. En la figura las imágenes se presentan en parejas; la primera de ellas antes del inicio de la inyección y las siguientes para dos diferentes estados de desarrollo del chorro en las mismas condiciones experimentales.

De la primera pareja de imágenes se observa como conforme se aumenta el nivel de sensibilidad del instrumento, aumenta el contraste del ruido de fondo. Con la disminución del tamaño de la fuente y por ende el aumento de la profundidad de enfoque, aparecen manchas en las imágenes, comunes para

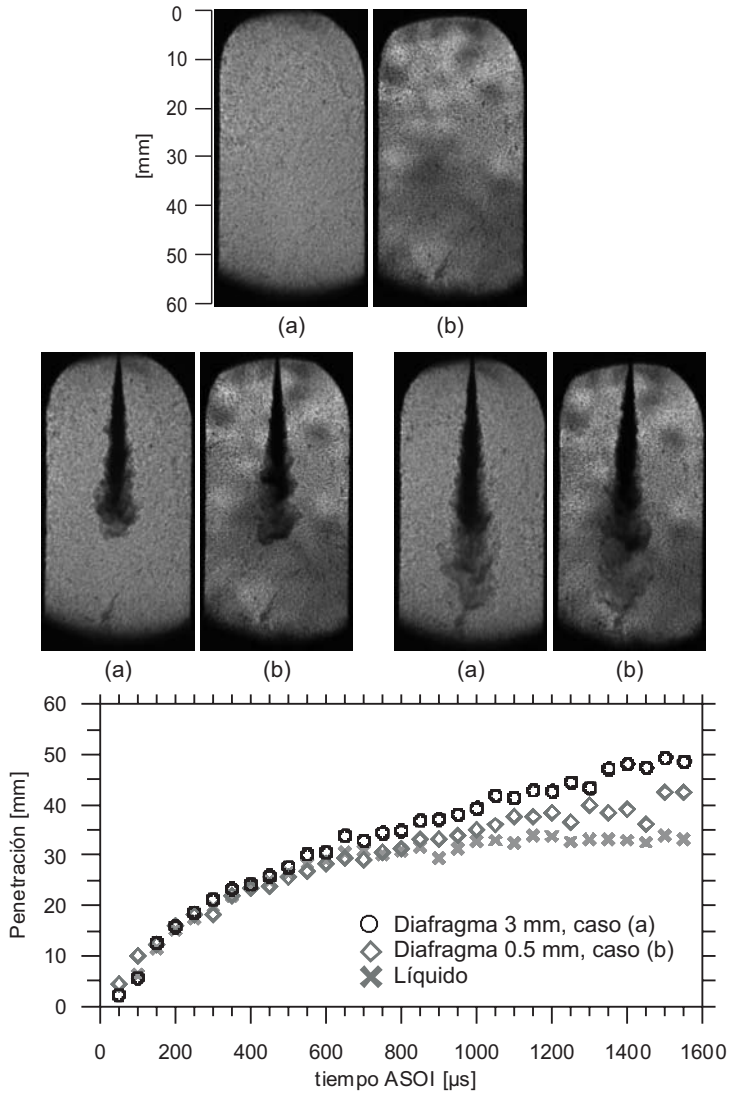


Figura 5.20: Imágenes de chorro Diesel evaporado para dos configuraciones de tamaño de la fuente radiante, y por lo tanto de la profundidad de campo, controlado por el sistema condensador: diafragmas (a) de 3 mm y (b) ‘pinhole’ de 500 μm .

los tres instantes de tiempo. Ya que cada imagen corresponde a inyecciones independientes, se concluye que estas manchas son causadas en las ventanas posiblemente por deposición leve de combustible.

Se observa además, como a medida que avanza la inyección, la concentración de combustible en el frente disminuye, disminuyendo igualmente el

contraste chorro-fondo. En la imagen esto se manifiesta como un cambio en el nivel digital del chorro, siendo más oscuro en la zona de mayor concentración. En el frente los niveles digitales alcanzan valores similares a los del fondo, especialmente crítico para el caso más sensible. El menor contraste del ruido de fondo del caso menos sensible, mejora el contraste chorro-fondo facilitando el análisis automático con los métodos de procesado digital.

La gráfica que acompaña las imágenes corresponde a la medida de penetración para los dos casos. Obsérvese como en los primeros instantes las medidas son bastante similares hasta el momento en el cual las gotas se evaporan y se alcanza la penetración líquida máxima. El chorro continúa penetrando en fase vapor, aunque para el caso de mayor profundidad de campo la penetración es inferior. Esta tendencia muestra problemas en el procesado al no lograr detectar apropiadamente el frente del chorro.

El efecto del filtrado espacial en aplicaciones a chorro Diesel evaporativo, difiere significativamente de los casos previos de chorro de aire comprimido y chorro isoterma. Para evaluar su efecto en la calidad y características de los resultados de la visualización, se registraron diferentes imágenes con diferentes configuraciones de filtrado. Para tal fin se implementó un sistema con una única cuchilla variando la dirección de corte (vertical u horizontal) y el porcentaje de filtrado.

En todos los casos se observó un patrón similar al que se puede apreciar en la figura 5.21. En ella se presentan diferentes imágenes de chorro Diesel para las mismas condiciones de ensayo, salvo el nivel de filtrado. En la parte inferior de las imágenes se expresa el porcentaje aproximado de radiación filtrada no difractada (orden ‘cero’ o frecuencias bajas de la transformada).

En las imágenes se puede apreciar como las características del chorro varían poco en función del nivel y posición de la obstrucción. Para el fondo, por el contrario, en ausencia o con un porcentaje de filtrado pequeño, se observan zonas de saturación que disminuyen conforme la cuchilla penetra en la transformada. No obstante, un filtrado pronunciado oscurece el fondo hasta niveles en los cuales se dificulta la determinación del borde del chorro. Con un corte medio, se consigue por lo tanto adquirir un nivel digital de fondo apropiado, facilitado la identificación de la frontera chorro-fondo.

A diferencia de las imágenes de chorro de aire comprimido de la figura 5.7, donde se observaban regiones luminosas, en las de chorro Diesel evaporado de la figura 5.21 estas no aparecen en ninguna de las configuraciones de filtrado. Este comportamiento sugiere que el ángulo desviado por el combustible evaporado ϵ es mayor que para el chorro de aire, por lo que la radiación sale del sistema chocando con las paredes de la cámara de combustión o simplemente

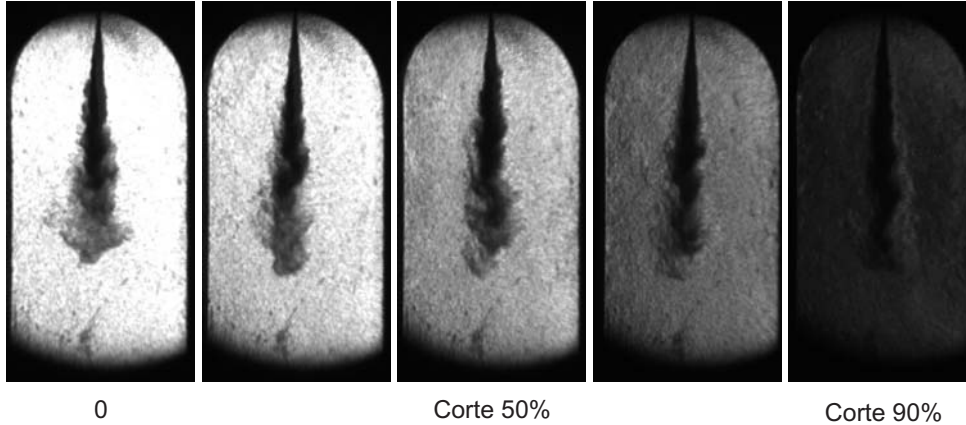


Figura 5.21: Shadowgram e imágenes Schlieren con diferentes niveles de filtrado (corte unidireccional vertical). Se observan diferencias en la intensidad del fondo más no en los niveles digitales del chorro.

saliendo del campo de visión del sistema de lentes.

Estas observaciones ratifican la afirmación de Zhao y Ladommatos [18] quienes aseguran que ambas técnicas, Schlieren y Shadowgraph, son perfectamente apropiadas para aplicaciones en motor debido a los altos gradientes de densidad. A este respecto, el control de la intensidad del fondo se consigue con el uso de filtros neutros ubicados en el camino óptico del haz emergente, evitándose así la saturación observada en la primera imagen de la figura 5.21. Aunque en transmisión el filtrado espacial pierde importancia a la hora de visualizar chorros Diesel, no sucede lo mismo en la de doble paso, que como se tratará en el próximo apartado, es útil para la eliminación de elementos no deseados como los reflejos de la ventana.

d. Aplicación

La información adquirida mediante la visualización Schlieren o shadowgraphy ha servido a la validación de modelos como el que presentan Desantes *et al.* [38]. Los autores proponen un modelo unidimensional de la evolución del chorro Diesel mediante una descripción de los mecanismos de mezcla del proceso de combustión. En su trabajo se muestra un ejemplo similar al de la figura 5.22 con imágenes de shadowgraphy (izquierda). Las imágenes, que corresponden a chorros inyectados con $P_{inj} = 110$ MPa en una atmósfera de aire con $\rho_a = 29$ kg/m³ y $T_a = 780$ K, se acompañan del registro, con cámaras ICCD, de la radiación dispersada por las gotas de combustible líquido (derecha

en falso color).

La descripción cualitativa comienza con el inicio de la inyección en el cual ambos sistemas registran la fase líquida del chorro hasta el momento en el cual se evapora todo el combustible atomizado y el chorro alcanza su longitud líquida máxima aproximadamente $270 \mu\text{s}$ después del inicio de la inyección. A partir de ese momento, el chorro sigue penetrando en la cámara de combustión en fase vapor sin que se observen cambios importantes en las imágenes de líquido. En las de vapor, se observa el fenómeno antes mencionado, que señalaba como debido a la menor densidad de combustible los niveles digitales del frente se acercan a los del fondo.

Con el inicio de las primeras reacciones químicas, aparecen nuevas fuentes generadoras de heterogeneidades; el frente del chorro de las imágenes se oscurece, mejorando el contraste chorro-fondo. Los sistemas intensificados comienzan a registrar la débil emisión de quimioluminiscencia. Este fenómeno, observado aproximadamente $820 \mu\text{s}$ después del inicio de la inyección, marca el comienzo del aumento en la intensidad de la radiación natural de la combustión y por lo tanto el fin del registro de la señal de líquido para evitar daños en el intensificador.

Los autores del trabajo, señalan además el aumento en el espesor del chorro en las zonas de reacción como sucede a $1170 \mu\text{s}$ ASOI. No obstante, los primeros registros de radiación incandescente se obtienen pasado un tiempo ($\approx 400 \mu\text{s}$) mediante el registro de la radiación de quimioluminiscente del OH.

5.3.4. Estudios en la configuración de doble paso

La configuración de doble paso se implementó para estudios con toberas reales de múltiples orificios en instalaciones con acceso único [39]. Debido a la presencia del espejo en el plano del inyector, el recorrido de la radiación por el medio heterogéneo es doble y por lo tanto el valor de ε mayor (ver ecuación 5.1). Para evitar la degradación de la superficie especular por deposición de productos de la combustión, se limitó su uso a la visualización de chorros inertes en atmósfera de N_2 . Al igual que en la visualización por transmisión en motor, en las imágenes de doble paso las fuentes de heterogeneidades son la turbulencia y los gradientes de temperatura y densidad en la cámara de combustión, y la presencia de las fases líquida y vapor del chorro.

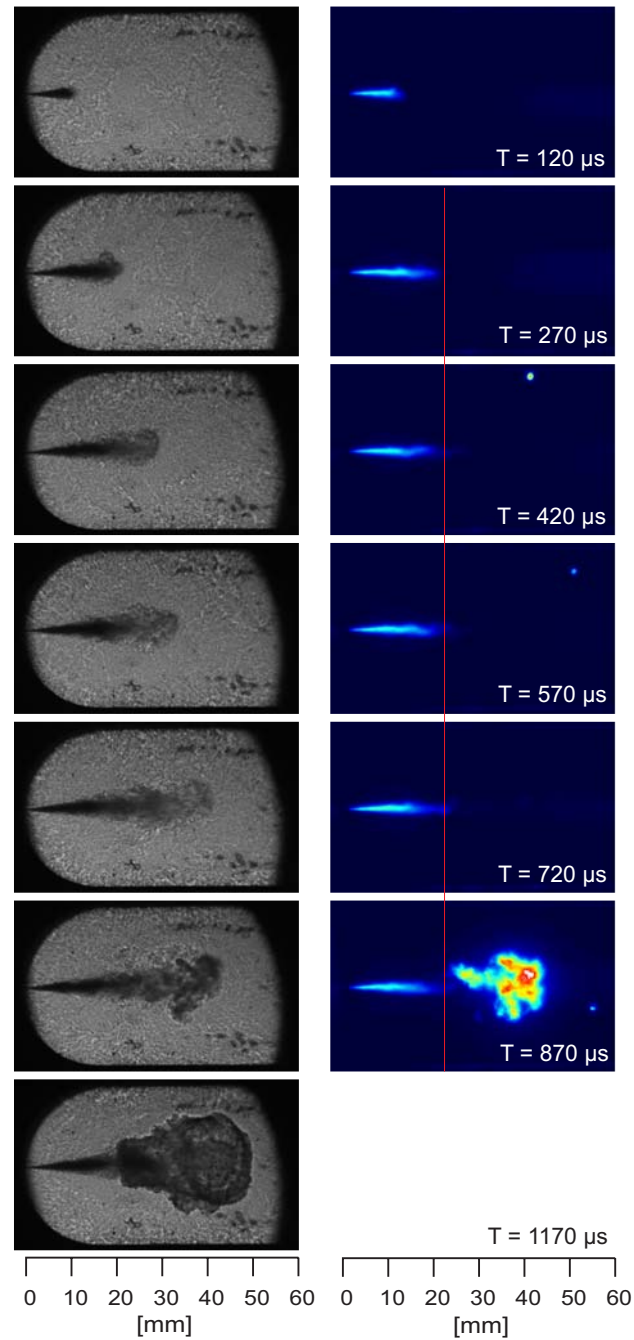


Figura 5.22: Ejemplo de imágenes de shadowgraphy (izquierda) y de la radiación dispersada por el chorro líquido (derecha) con $P_{inj} = 110 \text{ MPa}$ y $\rho_a = 29 \text{ kg/m}^3$ y $T_a = 780 \text{ K}$.

a. Instalación y configuración

El esquema de la culata utilizada en el estudio de toberas de múltiples orificios se puede observar en la figura 3.7. Según esta configuración, el recorrido total de la radiación, tanto incidente como reflejada a través del medio heterogéneo, es de 90 mm en una sección circular amplia de aproximadamente 50 mm de diámetro. Con estas características, la probabilidad de que la radiación desviada choque contra las paredes de la cámara de combustión, es menor que en el caso de transmisión (103 mm de recorrido en 30 mm ancho mínimo). De esta manera ha sido posible realizar una evaluación del efecto del alineamiento óptico del instrumento sobre las características de las imágenes.

La evaluación se llevó a cabo mediante la modificación del ángulo de incidencia entre el haz colimado y el espejo porta-inyector. Para conseguirlo se partió de un punto rigurosamente alineado (líneas discontinuas en el esquema de la figura 5.23) donde el haz colimado incide perpendicularmente sobre la superficie del espejo. Es decir, el eje óptico del instrumental coincide con el eje óptico del haz radiante. Sin modificar la posición del instrumental y por lo tanto el eje óptico, se desvió el eje del haz colimado α grados de su posición inicial (líneas continuas).

Las modificaciones en los valores de α se consiguieron mediante la inclinación del espejo esférico. Los valores se seleccionaron entre el valor centrado $\alpha = 0^\circ$ y el límite máximo de desalineación permitido por la geometría de la cámara de combustión para una correcta iluminación. Concretamente los valores de descentrado fueron: 0.6° , 1.2° y 1.8° .

b. Particularidades de la metodología de ensayo

Deposición de combustible: El fenómeno de deposición de combustible se presenta por las frecuentes inyecciones realizadas en un ambiente a alta temperatura. Este se observa en las caras interna de la ventana y el espejo porta-inyector donde se forma una fina película que afecta las propiedades ópticas de los elementos. En el caso del espejo, la deposición de combustible afecta a su reflectividad, llegándose a observar un efecto difusor en las imágenes de fondo. No obstante, la película de combustible en ocasiones es beneficiosa ya que corrige algunas imperfecciones, como rayas producidas en los frecuentes procesos de limpieza o las imperfecciones propias del granulado.

Estudios realizados en condiciones de ensayo, mostraron como después del arranque de la instalación, la degradación por deposición se acelera con las primeras inyecciones, sin embargo después de un determinado número éstas

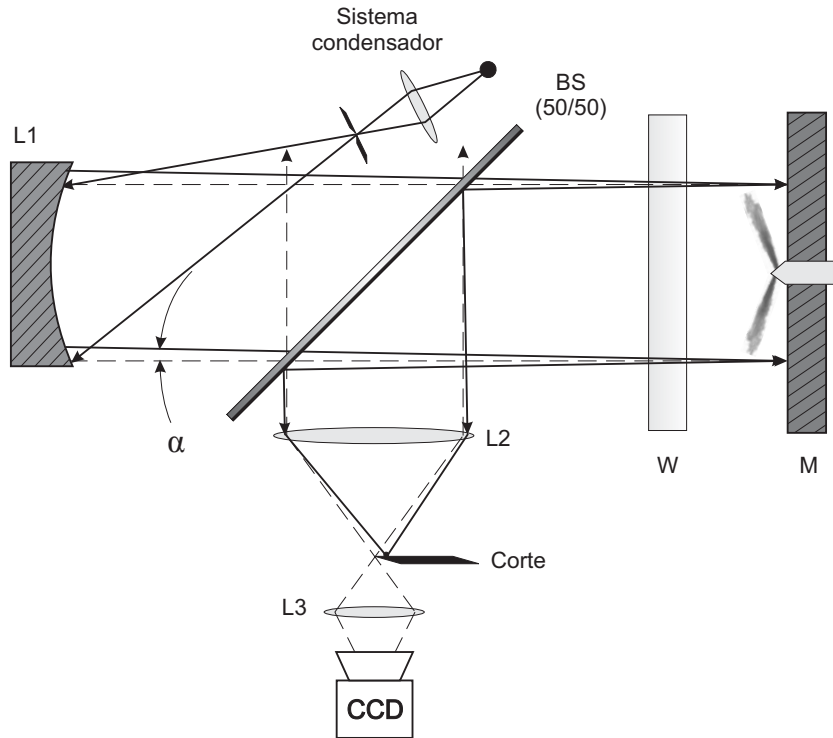


Figura 5.23: Configuración óptica de doble paso. En un sistema alineado el haz colimado incide sobre el espejo perpendicularmente (líneas discontinuas). El ángulo del haz se desvía del eje óptico α (líneas continuas) modificando las características de las imágenes.

(aproximadamente 50 inyecciones cada 20 ciclos de motor, a 500 rpm) y un tiempo de espera de unos 5 minutos, se crea una capa homogénea de combustible en la superficie del espejo, permitiendo una visualización aceptable y garantizando así la repetitividad en condiciones experimentales similares. Pasado un tiempo, que varía según la termodinámica dentro de la cámara de combustión, se crean zonas con capas no uniformes de combustible principalmente en la periferia tanto del espejo porta-inyector como de la ventana, obligando a parar la instalación para la limpieza de los componentes.

Efecto de los reflejos de la ventana: Uno de los principales problemas en la configuración de doble paso, es la presencia de reflejos en la imagen provenientes de las caras de la ventana de zafiro. Estos reflejos se superponen a la imagen de fondo como se observa en la figura 5.24 (a) afectando el contraste y por lo tanto la calidad de las imágenes.

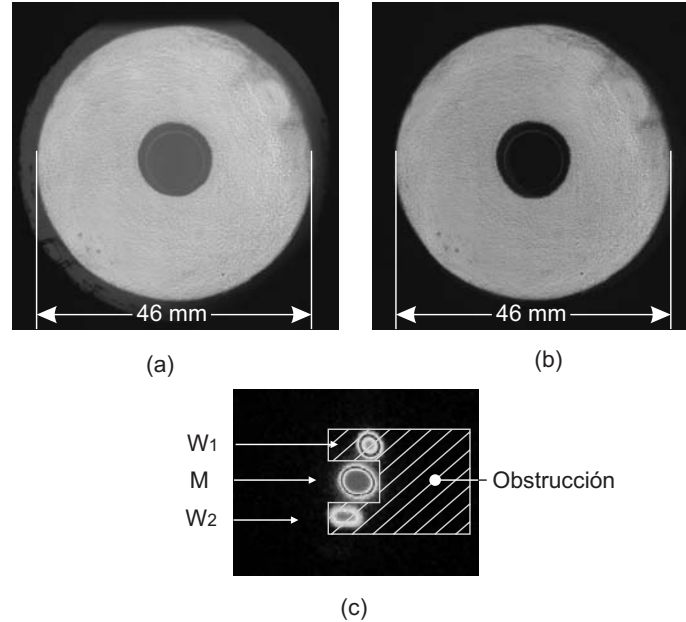


Figura 5.24: Efecto de los reflejos de las caras de la ventana (W_1 y W_2) en la imagen. (a) imagen con reflejos, (b) imagen filtrada y (c) patrones de difracción en el plano de Fourier. Mediante un arreglo de cuchillas se elimina la información de W_1 y W_2 .

Asumiendo que las caras de la ventana son perfectamente paralelas con la superficie especular del porta-inyector, en un sistema alineado, la radiación reflejada por éstas superficies recorrería el mismo camino óptico. Al pasar por la lente de enfoque **L2**, en el plano focal de la lente, se superpondrían los patrones de difracción formando un único patrón de bajas frecuencias. En el caso real, el paralelismo entre la ventana y el espejo no es perfecto, variando ligeramente con el apriete de los tornillos de sujeción de la ventana. En este caso, los ejes de propagación de la radiación reflejada varían ligeramente por lo que en el plano de Fourier se forman tres patrones diferentes correspondientes al reflejo del espejo y a las dos superficies de la ventana como se muestran en la figura 5.24 (c).

Con el uso de una máscara de corte o un arreglo de cuchillas apropiado como el que se esquematiza en la figura, se pueden eliminar los reflejos de la ventana de la imagen, dejando pasar solo la información proveniente del espejo porta-inyector (la posición de la obstrucción se debe corregir siempre después de cada limpieza de ventana). Con la eliminación de los patrones de difracción de los reflejos se eliminan las imágenes de las superficies de la

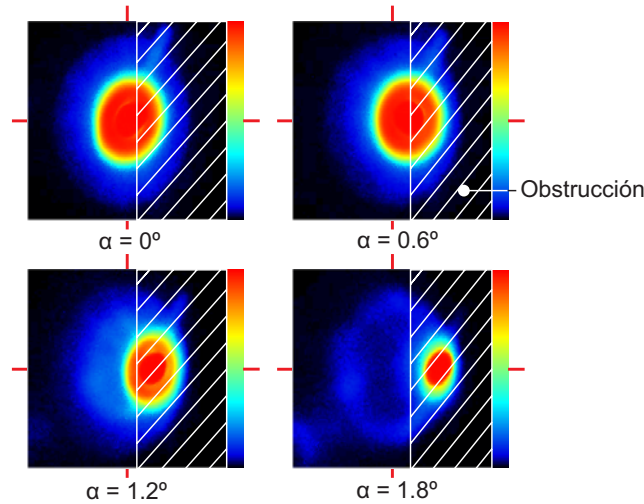


Figura 5.25: Imágenes en falso color de la variación, según el ángulo de incidencia del haz radiante, de los patrones de difracción registrados en el plano focal de la lente de enfoque **L2**.

ventana, mejorado el contraste del fondo como se observa en la imagen (b) de la figura.

Efectos de la alineación: La principal consecuencia de un sistema desalineado, es la forma de los patrones de difracción generados en el plano de Fourier que afectan las características de las imágenes. En la figura 5.25, se presentan en falso color, los diferentes patrones según se modifique el ángulo de incidencia del haz colimado. Las imágenes de la figura se registraron mediante el posicionamiento de una pantalla en el plano focal de **L2**. Representados los niveles de intensidad de la transformada, el nivel más intenso (rojo) corresponde a la radiación no difractada por las heterogeneidades del medio (frecuencias bajas).

En un sistema alineado con $\alpha = 0^\circ$, los patrones son simétricos y las frecuencias bajas se encuentran centradas en el eje óptico del sistema. Las dimensiones dependerán, como se informaba al inicio del capítulo, del tamaño de la fuente y de la relación de las distancias focales de las lentes. La radiación refractada y enfocada por la lente, se observa alrededor del punto de mayor intensidad en forma de anillos concéntricos cuyo diámetro dependerá del ángulo refractado por las diferentes fuentes de heterogeneidades. Si la desviación es muy pronunciada, parte de la radiación saldrá del sistema de lentes y no será enfocada por **L2**.

Tabla 5.1: Condiciones de ensayo en la evaluación de las técnicas en la variante de doble paso para el estudio de la evaporación del chorro Diesel.

Punto	P_{adm} [MPa]	T_{adm} [K]	T_a [K]	ρ_a [kg/m ³]
C1	0,14	323	790	22
C2	0,14	393	935	18
C3	0,18	323	790	30
C4	0,18	393	935	26

Una vez modificado el ángulo de incidencia ($\alpha > 0$), el punto de mayor intensidad de los patrones de difracción se desplaza a la derecha. Este fenómeno muestra como una parte de la radiación que antes era enfocada por **L2** sale del sistema, aunque otra parte que antes no estaba, ahora se puede registrar. Con el sistema de corte esquematizado en la figura, según el valor de α sea mayor, el porcentaje filtrado de la radiación no refractada aumentará hasta ser completamente eliminada para $\alpha = 1.2^\circ$ y 1.8° . Esto significa, que en los dos primeros ejemplos, las imágenes registradas por los sistemas de adquisición presentaran un fondo iluminado mientras en los casos finales, estas imágenes contarán con un fondo oscuro salvo la información de la radiación difractada.

c. Resultados

La evaluación de las características de las imágenes adquiridas con la variante de doble paso, según los diferentes ángulos de descentrado, se llevó a cabo para cuatro diferentes condiciones de ensayo. Variaciones en la presión y temperatura de admisión de N_2 , modificaron las propiedades de la atmósfera en el momento de la inyección. Los valores de las variables termodinámicas se muestran en la tabla 5.1 para los cuatro puntos evaluados: presión y temperatura de admisión P_{adm} y T_{adm} y densidad y temperatura en el momento de la inyección ρ_a y T_a . Estos últimos valores se estiman considerando el proceso de compresión politrópico con los valores de admisión y la medida instantánea de presión en la cámara [40].

Los parámetro de inyección se conservaron constantes para cada uno de los puntos ensayados:

- masa inyectada $m_f = 24$ mg/ciclo.
- presión de inyección $P_{inj} = 80$ MPa.

- inicio de la inyección 4° antes de PMS.
- velocidad del motor 500 rpm.

Para cada configuración experimental y valor de α , se registraron secuencias completas que cubrieran todo el evento de inyección con 5 imágenes por instante de tiempo ASOI.

Análisis de las imágenes

Un ejemplo de los resultados de la visualización para los diferentes niveles de descentrado, se presentan en la figura 5.26, correspondientes al caso de referencia C1 de la tabla 5.1. Las imágenes que componen la figura se han registrado en un tiempo en el cual la concentración de combustible evaporado es suficiente para ser fácilmente visualizada: después de que el chorro ha alcanzado su longitud líquida máxima y antes de que el frente evaporado choque contra las paredes de la cámara de combustión.

En las imágenes se observan diferentes fenómenos de interacción entre el haz colimado y el chorro bifásico. Una parte importante de la radiación es absorbida o difractada por las gotas de combustible líquido. Esta radiación sale del sistema de lentes por lo que existirá para cualquier configuración óptica regiones oscuras en la imagen. Otra fracción de la radiación es difractada por los gradientes de densidad en la zona del chorro evaporado. Sumado a esto, se observa el ruido de fondo, que como se indicó previamente en las aplicaciones de la variante de transmisión a motor, es causado por los gradientes de índice de refracción de menor intensidad por los cambios en la densidad y la presencia de turbulencia en la atmósfera de N_2 .

Concretamente, en la imagen registrada cuando $\alpha = 0^\circ$ el chorro es una sombra en la cual no se perciben cambios importantes en el nivel digital. La ausencia de radiación en el chorro, muestra un resultado similar al observado si se filtrasen las frecuencias altas mediante el posicionamiento de un filtro paso-bajo con el tamaño de la imagen de la fuente radiante [22]. Dicho de otra forma, en el sistema alineado, gran parte de la radiación desviada por los cambios de densidad del chorro sale del sistema de lentes y solo se registra la radiación no difractada. Por el contrario, en el ruido de fondo los cambios de n parecen menores por lo que parte de la radiación desviada es enfocada en el plano focal de **L2**.

Debido a la configuración de la obstrucción que se esquematiza en la figura 5.25, la cantidad de radiación que alcanza el sensor de la cámara es muy alto

para los puntos de α menores (0 y 0.6). Para evitar la saturación del sensor, se antepusieron al objetivo fotográfico filtros neutros con niveles de densidad óptica entre 2 y 3 (1 y 0.1 % de transmitancia, respectivamente).

Con el inicio del descentrado $\alpha = 0.6^\circ$, se observa un aumento en el contraste de los patrones de ruido del fondo. El motivo de este fenómeno, es posiblemente el mayor filtrado de los patrones de difracción de baja frecuencia al conservarse invariable la posición del filtro. De la misma manera, se empiezan a observar regiones brillantes en la periferia del chorro correspondientes a la radiación dispersada en la frontera. Esta información corresponde a radiación con valores altos de ε que en un sistema alineado no es enfocado por **L2**.

Con el aumento de α se observa un cambio significativo en las características de las imágenes. Como se muestra en la figura para los casos $\alpha = 1.2^\circ$ y 1.8° , en el chorro aparecen dos diferentes regiones: una oscura relacionada con las zonas de mayor concentración de combustible, rodeada por zonas con niveles de intensidad altos que se asume corresponden a partes evaporadas del chorro. Debido al mayor nivel de corte se prescinde del uso de los filtros neutros ya que la radiación no difractada correspondiente al fondo se filtra o sale del sistema de lentes. De igual manera, la información del ruido de fondo deja de ser registrada por los sistemas de adquisición; las nuevas imágenes muestran un fondo homogéneo con niveles de intensidad bajos.

La mejora del contraste chorro-fondo, mediante el registro de la radiación dispersada por algunas zonas del chorro y la eliminación de los patrones de ruido de fondo, sugieren un valor mayor ε , y por lo tanto en los gradientes de n , para el combustible que para las fuentes generadoras de ruido. Los niveles del chorro varían en función de la concentración de combustible que es máxima en las zonas más cercanas al orificio del inyector. En esta parte, la cantidad y concentración de gotas es tan alta que la radiación difractada no se llega a registrar.

De esta manera se ratifican las observaciones realizadas al caso de transmisión anteriormente expuestas, asegurando que tanto la técnica de Schlieren como de Shadowgraph son perfectamente válidas para la visualización de chorros Diesel evaporativos. No obstante, y según se requieran unas características especiales de las imágenes, la técnica de Schlieren, en una configuración especial de lentes de mayores dimensiones y filtrado más complejo, tendría una ventaja especial en la eliminación del ruido de fondo, causado por los gradientes de n de la atmósfera donde se inyecta, y en las características de intensidad luminosa del chorro.

Efecto de la densidad del gas en las imágenes

Las imágenes correspondientes a los puntos restantes de la tabla 5.1, se presentan en las figuras 5.27, 5.28 y 5.29 para los correspondientes casos C2, C3 y C4. En todas ellas se observa un patrón similar al observado para el caso C1 tanto para el chorro como para el fondo, aunque con diferente magnitud.

Un factor común observado en todas las imágenes es la ausencia de los patrones de ruido de fondo para los valores máximos de descentrado. No obstante, los valores ε y por lo tanto las imágenes, varían en función de las propiedades termodinámicas del gas (presión y temperatura). Estas diferencias quedan expuestas en la presencia o no de ruido observadas en las imágenes de los diferentes casos registradas con la configuración $\alpha = 1.2^\circ$.

Obsérvese para los casos de menor presión de admisión, C1 y C2, la ausencia de ruido y la poca variabilidad entre las imágenes con descentrado mayor ($\alpha = 1.2^\circ$ y 1.8°). Con el aumento de la presión en C3, aunque la temperatura es la misma de C1, aumenta la densidad y por lo tanto los niveles de ε por el ruido. En C4, aunque la densidad es menor al caso anterior, la mezcla del gas admitido a mayor temperatura con el gas remanente de la cámara de combustión aumenta los gradientes de n y con ello el contraste de los componentes del fondo de la imagen.

En cuanto a los chorros registrados con las configuraciones $\alpha = 0^\circ$ y $\alpha = 0.6^\circ$, solo se observan diferencias en la geometría según las diferentes condiciones en que se lleva a cabo la inyección. No obstante, en todas las imágenes, estos son sombras que indican que la radiación dispersada por el vapor sale del sistema. De estas imágenes se puede calcular fácilmente la frontera del chorro, siempre que el ruido no influya en el proceso de segmentación. Es en la configuración centrada, donde se aprecia para todos los casos menor contraste del ruido y por lo tanto mayor contraste chorro-fondo.

En las imágenes de chorros adquiridas en las configuraciones $\alpha = 1.2^\circ$ y $\alpha = 1.8^\circ$, se observa una región oscura rodeada por otra con niveles de intensidad mayores. Concretamente, es para el caso de mayor nivel de descentrado, y debido a la ausencia de ruido, donde se observa el mayor contraste ruido-fondo para estas dos configuraciones. No obstante, existirá en la frontera de transición entre zonas, niveles digitales similares a los del fondo que afectarán, como se verá en el último apartado del capítulo, el análisis automático de las imágenes.

La relación de las regiones que componen el chorro cambia significativamente entre las diferentes condiciones de ensayo, observándose una mayor región con niveles digitales altos en los casos de mayor temperatura C2 y C4.

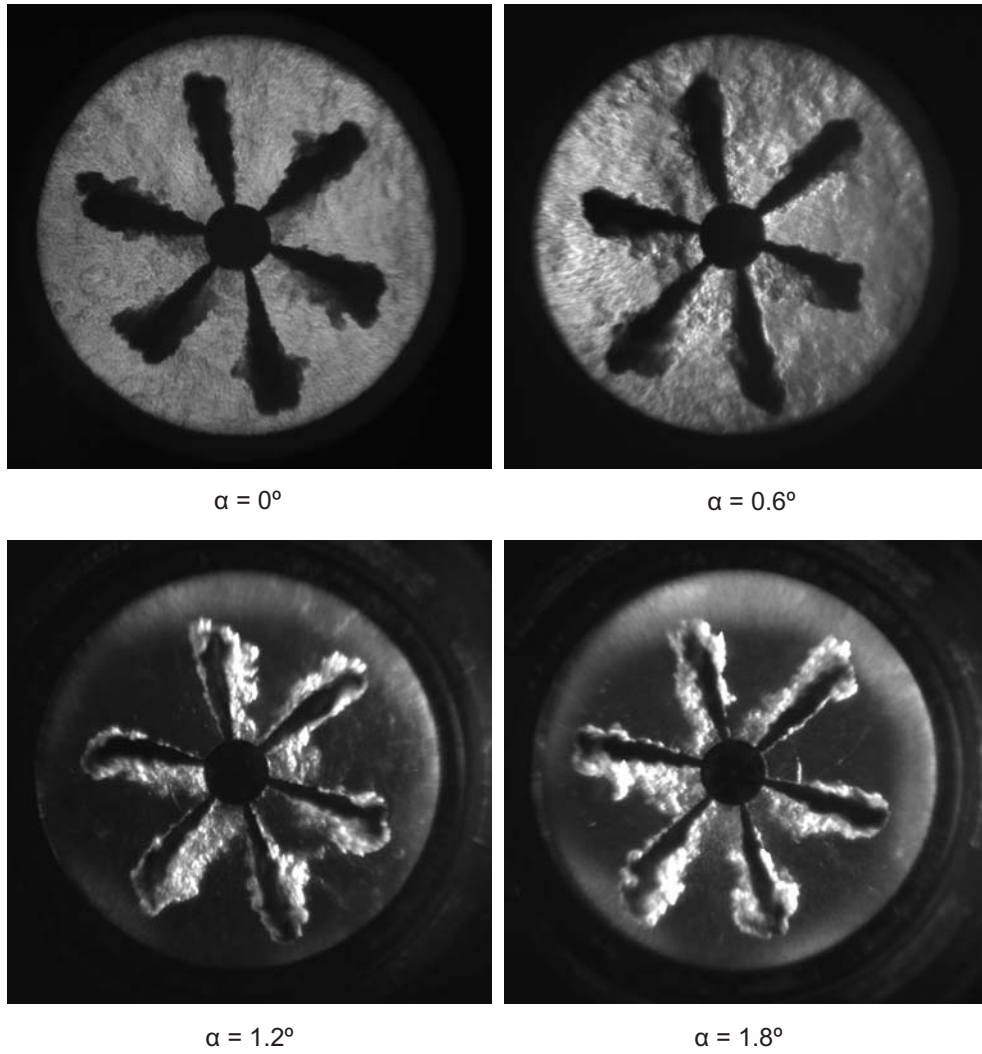


Figura 5.26: Variación de las características de las imágenes según el nivel de des-centrado. Caso de referencia C1: $T_a = 790\text{ K}$ y $\rho_a = 22\text{ kg/m}^3$.

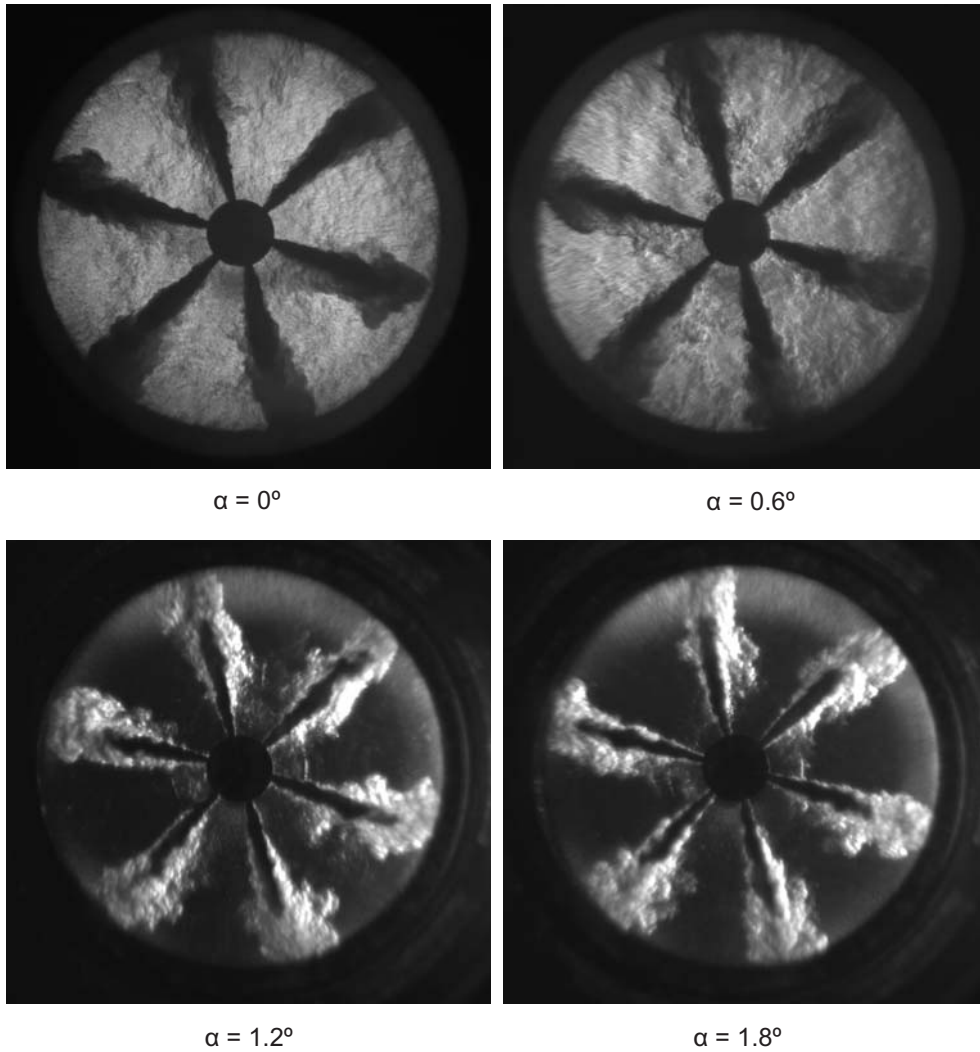


Figura 5.27: Variación de las características de las imágenes según el nivel de des-centrado. Caso de referencia C2: $T_a = 935\text{ K}$ y $\rho_a = 18\text{ kg/m}^3$.

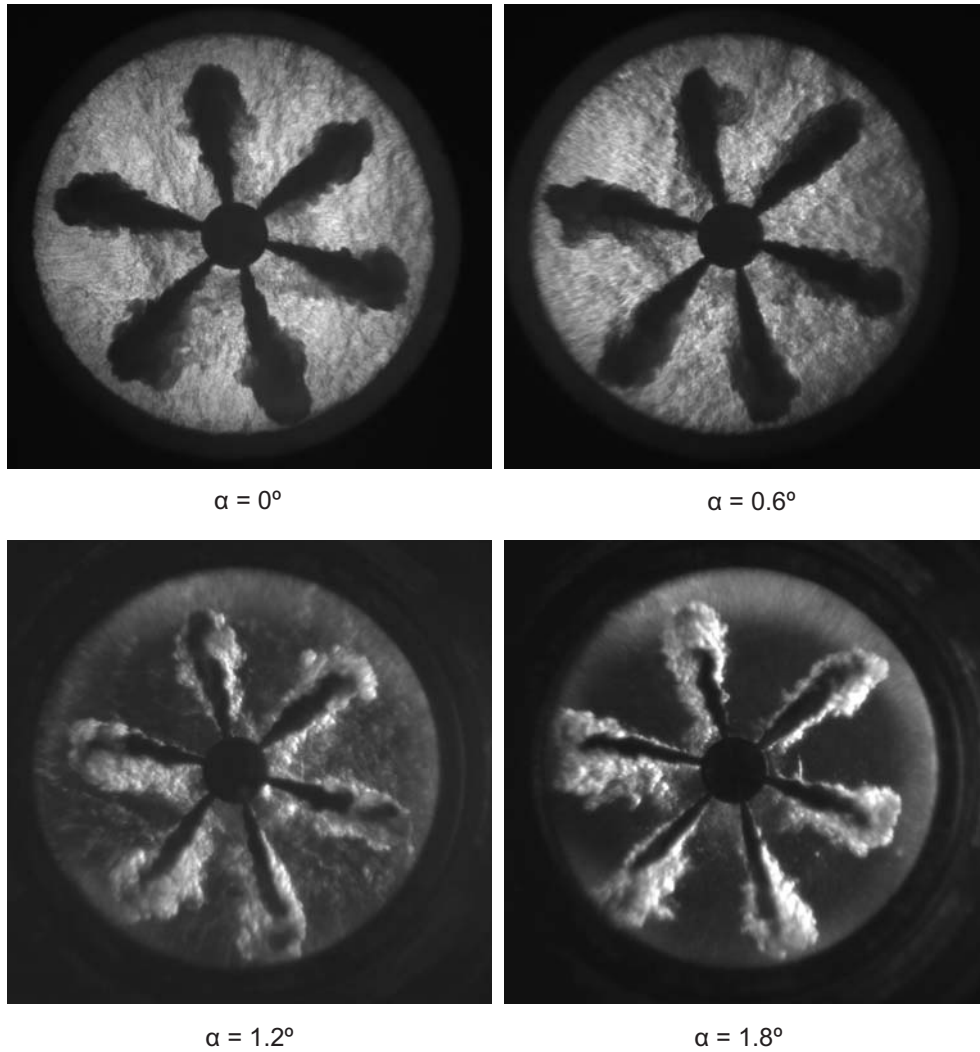


Figura 5.28: Variación de las características de las imágenes según el nivel de des-centrado. Caso de referencia C3: $T_a = 790\text{ K}$ y $\rho_a = 30\text{ kg/m}^3$.

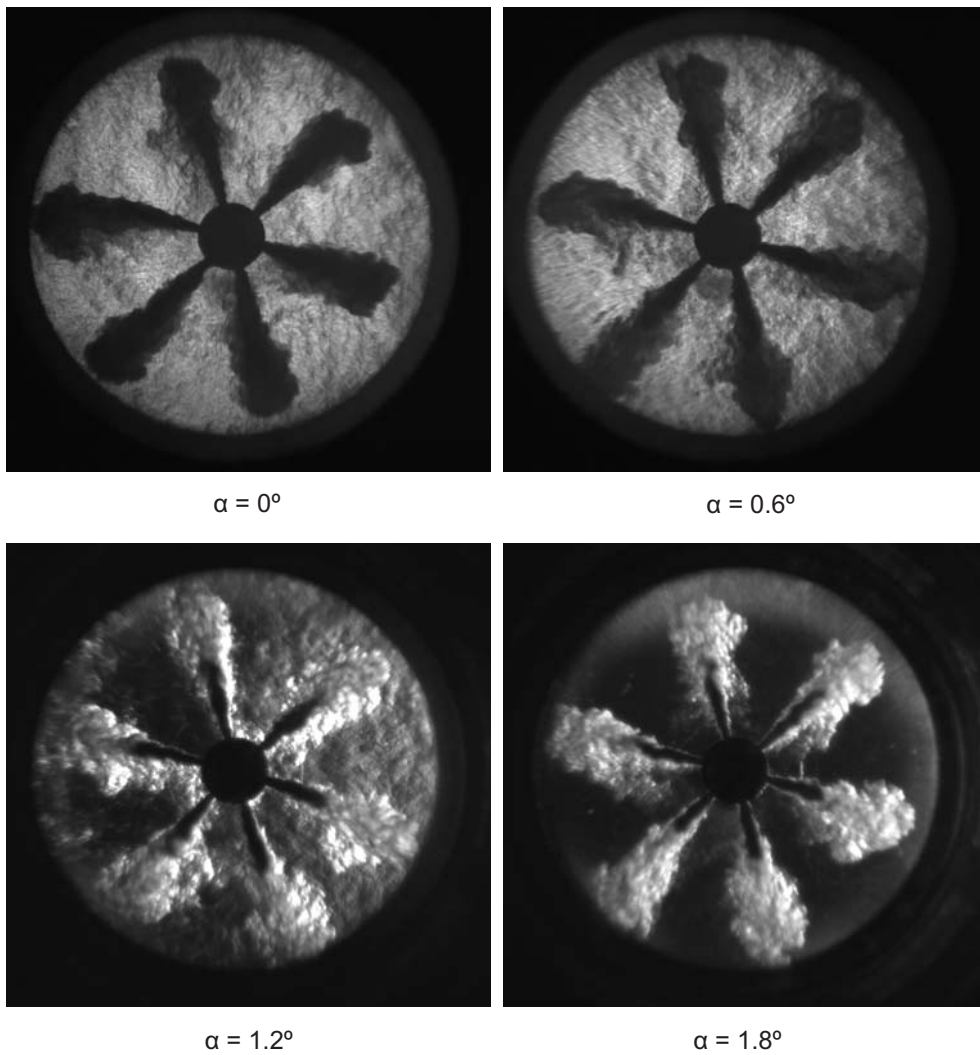


Figura 5.29: Variación de las características de las imágenes según el nivel de des-centrado. Caso de referencia C4: $T_a = 935\text{ K}$ y $\rho_a = 26\text{ kg/m}^3$.

Con el aumento de la región luminosa, correspondiente a las zonas del chorro de menor concentración, disminuye la zona oscura de mayor concentración de combustible. Esta observación en la relación de las regiones luminosa y oscura podría indicar una evaporación más rápida del combustible, y por lo tanto, una longitud líquida máxima LL menor para el caso C4 con P_{adm} y T_{adm} máximos.

Recurriendo a la regresión $LL \propto P_{inj}^a \cdot d_o^b \cdot \rho_a^c \cdot T_a^d$, que relaciona el diámetro de la tobera d_o , la presión de inyección P_{inj} y la densidad y temperatura del gas en el momento de la inyección ρ_a y T_a , se consigue estimar los valores esperados de longitud líquida máxima LL. Para los puntos ensayados, solo las variables de densidad y temperatura del aire cambian con lo que se puede definir la relación:

$$\frac{LL_1}{LL_2} = \left[\frac{\rho_{a1}}{\rho_{a2}} \right]^c \left[\frac{T_{a1}}{T_{a2}} \right]^d$$

con los valores experimentales $c = -0.5$ y $d = -1.6$ tomados de los estimados tanto por Siebers [21] como por García [41].

El análisis da como resultado medidas de penetración 84 %, 86 % y 70 % menores que LL_{C1} para los casos C2, C3 y C4, respectivamente. Se confirma con ello, una evaporación más rápida de los puntos de mayor densidad, especialmente el de mayor temperatura.

La relación entre la región oscura del chorro en las configuraciones descentradas con la fase líquida se confirma con las gráficas de la figura 5.30. En ésta, se presentan las medidas de longitud de la fase líquida y penetración del chorro, con las medidas del frente de la región oscura. La medida de la longitud líquida se obtiene mediante el registro de la radiación de dispersión de Mie.

Los resultados muestran para todos los casos, una medida siempre mayor de la región oscura del chorro frente a la longitud líquida estable. Esta diferencia, es especialmente notable en los puntos de máxima densidad donde tanto la región oscura como la fase líquida penetran solidarias hasta que se evapora todo el combustible líquido. A partir de este momento el chorro sigue penetrando hasta que la región oscura se separa del frente del chorro que es el frente de la región luminosa. El chorro luminoso, continúa su camino hasta alcanzar el límite de la cámara de combustión.

Este resultado evidencia que intentar extraer información cuantitativa sobre la fase líquida a partir de la zona oscura de las imágenes de Schlieren carece de sentido por dos motivos: por una parte, la longitud de la zona oscura depende mucho de los detalles de la configuración óptica utilizada; por otra parte, como se deriva de las curvas mostradas en la figura 5.30, la longitud

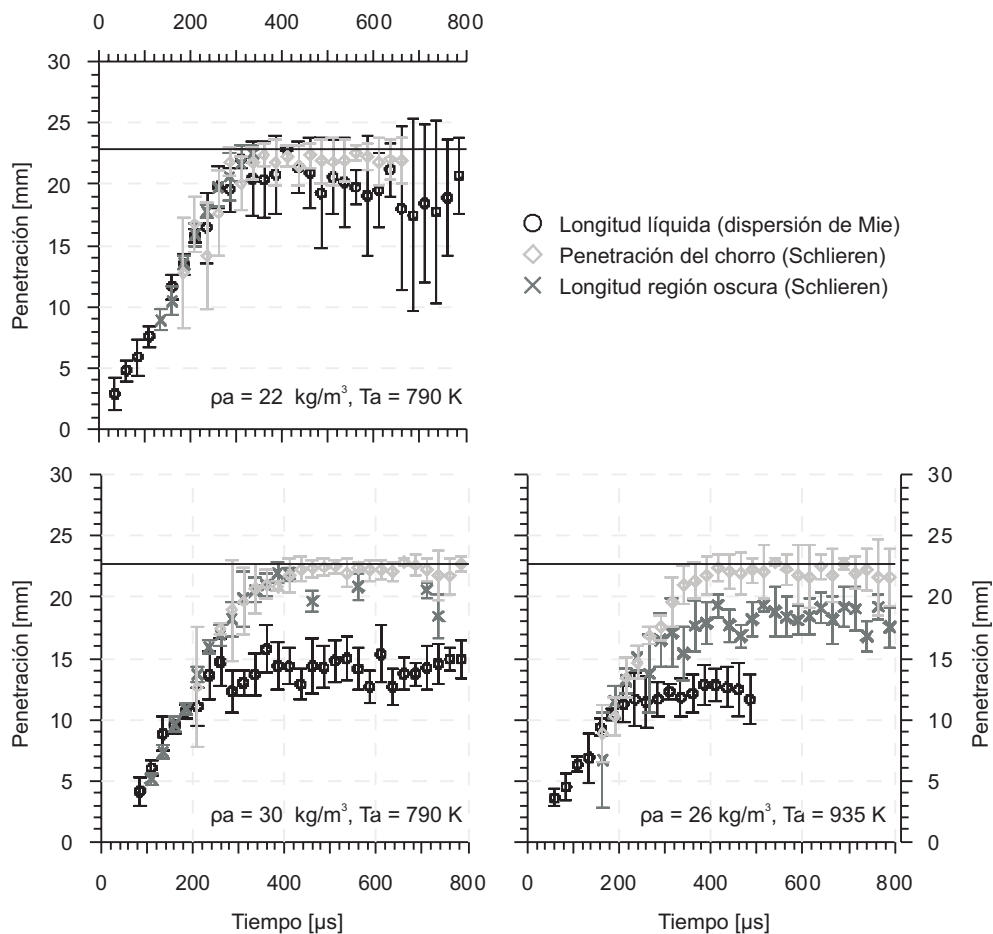


Figura 5.30: Comparación entre las medidas de penetración del chorro de los casos característicos mediante el registro de la señal de dispersión de Mie y la señal de Schlieren en la configuración descentrada $\alpha = 1.8^\circ$.

de la zona oscura y la longitud líquida del chorro no guardan una relación constante en distintas condiciones de ensayo, incluso utilizando exactamente la misma configuración óptica.

5.4. Procesado de las imágenes

La visualización mediante el uso de las técnicas de Schlieren y Shadowgraph, aportan al estudio del chorro Diesel información cualitativa del proceso de evaporación. No obstante, de las imágenes se puede extraer una información

más refinada y detallada mediante técnicas de *procesado digital*. La medición de características geométricas como la penetración, ángulo y ancho del chorro, área ocupada dentro de la cámara de combustión, etc., requieren el cálculo preciso de la frontera chorro-fondo. Esta es una información muy valiosa en la caracterización de sistemas de inyección, o en la validación de modelos que estudien la fenomenología del chorro Diesel en condiciones evaporativas.

El origen de los algoritmos aquí propuestos son los presentados en el capítulo anterior para el análisis de imágenes de chorro líquido. Estos se basan en la definición de un valor umbral que es el nivel digital que define la frontera de clases. El umbral se calcula de los histogramas de las imágenes por lo que su estudio y caracterización es un factor muy importante y base de la presente sección. Se ofrece además una descripción detallada de las variantes aplicadas a los algoritmos para el análisis de las nuevas imágenes. Las funciones que no se modifican, se comentan con el objetivo de seguir la estructura de procesado digital de imágenes de chorros Diesel presentada en § 3.5.1.

5.4.1. Características de los histogramas

Existe una importante variabilidad entre los perfiles de los diferentes tipos de histogramas de las imágenes de Schlieren y shadowgraphy, según las características de las clases visualizadas chorro-fondo. Por un lado el chorro puede ser una sombra homogénea o contar con niveles digitales de intensidad variable; regiones con diferentes niveles de gris, llegando incluso a la saturación. Por otro lado, la clase fondo esta constituida por la radiación que no ha sufrido modificaciones en la forma de los frentes de onda y la que es afectada por la turbulencia y los gradientes de temperatura y densidad dentro de la cámara de combustión.

Estos factores de comportamiento de clases varía según la configuración en que se lleva a cabo la visualización: según se inyecte en maquetas isotermas, o motores ópticos y maquetas a alta temperatura. En el motor maqueta, las dos configuraciones de culata generan igualmente diferencias entre imágenes y por lo tanto en sus histogramas.

a. Histogramas de imágenes por transmisión

Un ejemplo de histogramas de imágenes en la configuración de transmisión se presentan en la figura 5.31. En color oscuro, se muestran los correspondientes a las imágenes de los tiempos 720 y 1170 μs ASOI de la figura 5.22 que se anteponen a los de una imagen sin chorro en color más claro. La primera

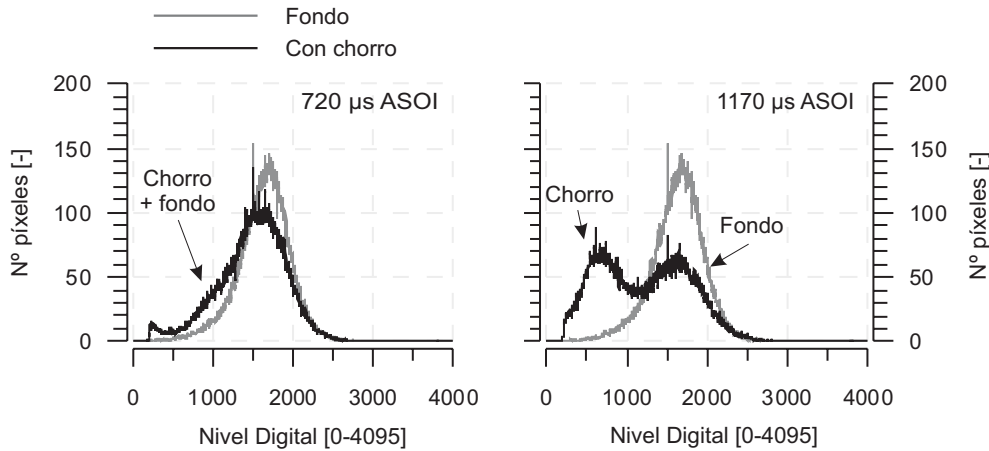


Figura 5.31: Histogramas de imágenes de chorros adquiridas en transmisión, antes y después del SOC (color oscuro), antepuestas a un histograma de una imagen sin inyección (color claro).

de las imágenes de chorros, pertenece a un tiempo en el cual aun no se han iniciado los procesos químicos que darán paso a la combustión. No obstante, para el tiempo mayor, estos procesos ya se han iniciado por lo que cambian las características de las imágenes y, por lo tanto, la forma de los histogramas.

Los histogramas de imágenes sin chorro presentan una forma de distribución casi simétrica con una importante presencia de ruido. A diferencia de la distribución de fondo de las imágenes de chorro líquido, en las de Schlieren y shadowgraphy la distribución de niveles digitales es mayor por lo que la probabilidad de encontrar niveles compartidos entre las clases, es igualmente mayor (la probabilidad de error es mayor por la superposición de distribuciones).

En presencia de chorro, los histogramas cambian observándose un nuevo pico en los niveles digitales bajos. Concretamente, en el histograma de la imagen sin combustión, se observa un máximo representativo de píxeles con niveles digitales por debajo del valor de 500, mientras en el rango entre los 500 y 1300, aproximadamente, se observa una superposición de las distribuciones de chorro y fondo. Para demostrarlo, obsérvese la imagen de la figura 5.22 correspondiente al tiempo $720 \mu\text{s}$, con características similares a las de las imágenes registradas en atmosfera inerte: cerca del orificio de la tobera los valores de nivel digital del chorro son muy bajos, mientras que en el frente, estos alcanzan valores más cercanos a los del fondo.

Con el desarrollo de la combustión, se mejora el contraste entre clases y el chorro comienza a ocupar mayor número de píxeles en la imagen. Este

fenómeno, se observa en el histograma por la mejor definición del perfil de la distribución del chorro y la disminución del pico del fondo. No obstante, se sigue observando la superposición de clases por la mayor dispersión del ruido.

b. Histogramas de imágenes en doble paso

En la variable de doble paso, se presentan dos grupos de histogramas según el nivel de descentrado del instrumento: los de las imágenes adquiridas con $\alpha = 0^\circ$ y en las cuales $\alpha = 1.8^\circ$. El primero de los ejemplos, sigue un patrón similar al observado para otro tipo de imágenes, esto es, las imágenes están conformadas por dos clases que son el chorro (oscuro) y el fondo (iluminado). No sucede lo mismo para la segunda configuración en la cual además de la región oscura del chorro, se cuenta con una región con niveles de intensidad altos cuyas proporciones varían según la calidad de la evaporación. En este caso, las clases del sistema de selección son tres: el fondo y el chorro tanto la región oscura como la iluminada.

Al igual que los histogramas de las imágenes de transmisión, en los de doble paso centrado (histograma superior de la figura 5.32) se observa una dispersión relativamente grande para los niveles digitales del fondo. Como se puede apreciar en la imagen, el máximo de la distribución de fondo en ausencia de chorro, curva de color claro en la figura, se presenta en un rango medio de niveles digitales del rango dinámico de la imagen. Contrariamente, las imágenes adquiridas en la configuración $\alpha = 1.8^\circ$, estas distribuciones muestran sus picos característicos en niveles relativamente bajos, debido a la eliminación de la radiación no difractada.

Para el caso en el que se inyecta (histogramas en color oscuro), la distribución de la clase chorro queda claramente identificada para la configuración centrada debido a la poca dispersión de los niveles que los componen; la radiación difractada por la fase vapor sale del sistema de lentes por lo que el chorro es predominantemente sombra. Obsérvese en la región de superposición (entre los picos característicos) como son pocos los píxeles que perteneciendo a una clase comparten nivel digital con los de la otra.

No se observa el mismo comportamiento en los histogramas de las imágenes descentradas. En el ejemplo de menor densidad (caso C1 con $\alpha = 1.8^\circ$), en la cual la región oscura del chorro es mayor, se observa un aumento en la cantidad de píxeles para los niveles más bajos del histograma. No obstante, la dispersión entre niveles es muy alta ya que buena parte de la radiación difractada es ahora registrada; esto significa, que existirá una región de transición entre las dos regiones del chorro. De igual manera no se observa un parámetro de forma

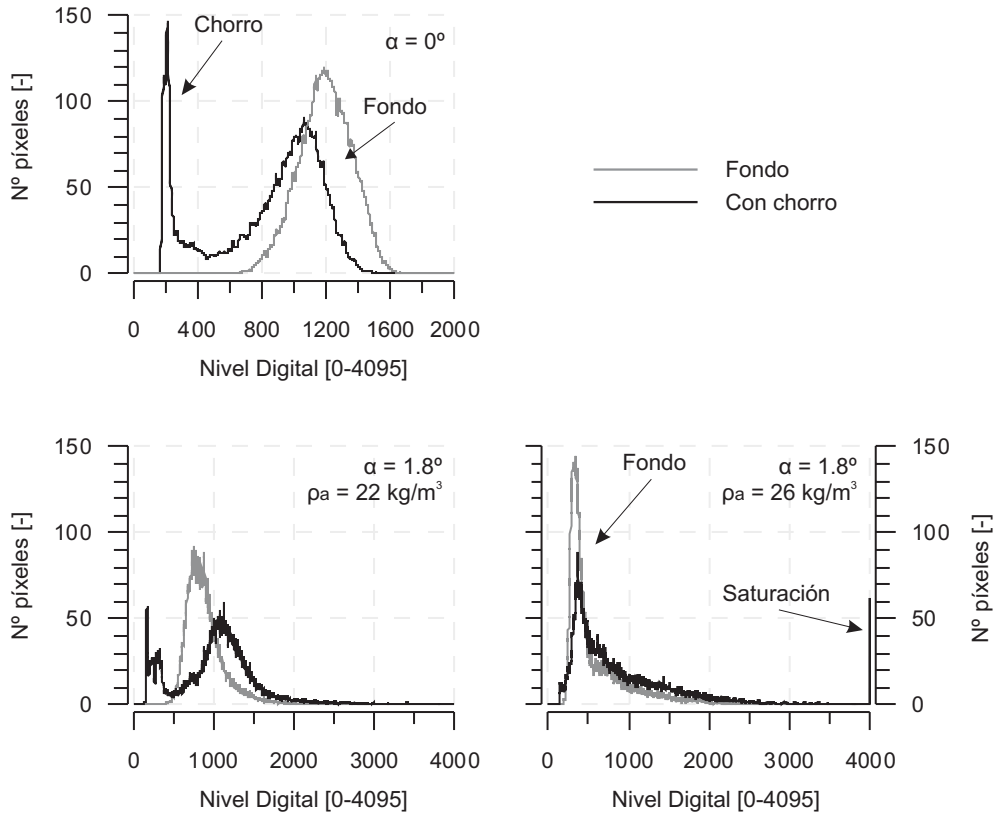


Figura 5.32: Histogramas de imágenes registradas con la variante de doble paso, de chorros (color oscuro) antepuestos a un histograma de una imagen sin inyección (color claro). Corresponden al caso centrado $\alpha = 0^\circ$ y descentrado $\alpha = 1.8^\circ$ con variaciones en la termodinámica de la atmósfera de N_2 y por lo tanto de la proporción de las clases del chorro.

que permita identificar la región del chorro con niveles altos de intensidad luminosa.

Con el aumento de la densidad (caso C4), la relación de regiones cambia, disminuyendo el número de píxeles con niveles digitales bajos y aumentando aquellos con nivel digital alto. En el histograma, esto se manifiesta con la presencia mínima de los niveles más oscuros y la aparición de píxeles con niveles de saturación. Aunque del fondo se siga identificando fácilmente el pico característico, no se puede decir lo mismo de la distribución de las dos regiones del chorro.

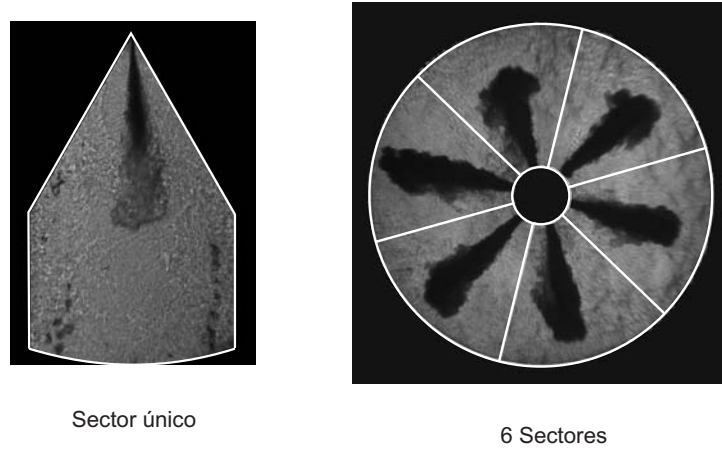


Figura 5.33: Definición de los sectores para el procesado de las imágenes de Schlieren y shadowgraphy de uno o más chorros.

5.4.2. Pre-procesado

A diferencia del tratamiento de las imágenes de chorro líquido, en las de Schlieren y shadowgraphy, la sustracción de fondo es una parte importante del proceso debido a la gran dispersión de los niveles digitales del fondo. Además y gracias a la ausencia de CFA en el sistema de adquisición empleado en la visualización, la reconstrucción del color no fue necesaria por lo que la interpretación que se hace de la imagen se limita a la definición de la matriz de dimensiones $M \times N$ con niveles digitales determinados por la función $f(x, y)$ de la ecuación 4.1.

5.4.2.1. Pre-segmentación y cálculo de histogramas

La pre-segmentación o definición de sectores consiste en determinar regiones en la imagen, limitadas por el campo visible de los accesos, para procesar los chorros de forma independiente. En el caso de transmisión, el sector único está acotado por el ancho de las ventanas y la longitud máxima alcanzada por el chorro como se muestra en la imagen izquierda de la figura 5.33. Con el objetivo de disminuir el número de píxeles del fondo, se eliminan otras regiones de la imagen donde la probabilidad de existencia de chorro es nula.

La definición de sectores en imágenes con múltiples chorros se lleva a cabo de forma similar a la de las imágenes de chorro líquido con toberas multiorificio. La imagen se divide en un número de sectores igual al número de chorros, y

los radios máximo y mínimo son el límite de las ventanas y el del inyector como se observa en la imagen derecha de la figura 5.33.

Por cada sector se calcula un histograma por lo que el nivel digital umbral puede ser diferente para cada chorro de una misma imagen. Estos se obtienen, como se explicaba en § 4.3.1, contabilizando el número de píxeles de cada nivel digital en todo el rango dinámico de la imagen (0-4095).

5.4.2.2. Homogenización del fondo

Existen diferentes algoritmos empleados en la minimización de ruido que afectan de diferente manera las características de las imágenes. Una configuración inapropiada podría generar pérdidas de información y modificaciones indeseables en la forma o en las propiedades de los objetos. Los algoritmos implementados en la homogenización de las imágenes del presente capítulo fueron de suavizado mediante la utilización de filtros o máscaras de convolución espaciales, y el de sustracción de fondo. Un filtrado en el dominio de las frecuencias de la imagen obtenida mediante la FFT bidimensional, generó resultados similares al filtrado espacial, aunque con un coste computacional bastante alto siendo inapropiadas para el objetivo de esta tesis.

a. Filtrado espacial

Los algoritmos de filtrado espacial son implementados para suavizar imágenes mediante la minimización o eliminación de cambios bruscos de nivel digital. Consisten en asignar a un determinado píxel el valor de nivel digital medio de los píxeles vecinos [42, 43]. Las dimensiones del filtro determinan qué vecinos son tenidos en cuenta en el cálculo del valor medio y se eligen según el nivel de suavizado requerido; un filtro con grandes dimensiones puede causar pérdidas excesivas de contraste en la frontera entre clases.

El suavizado de las imágenes de este trabajo, se llevó a cabo con un filtro de media de tamaño 3×3 . Este es un filtro poco agresivo que tiene como función asignar al píxel central el valor de nivel de la media de sus 8 vecinos. En caso de presentarse pérdidas en el chorro, estas sólo se darán en el primer píxel de la frontera.

b. Sustracción de fondo

Los algoritmos de sustracción tienen como objetivo mejorar el contraste entre las clases mediante modificaciones en la forma de las distribuciones y la

homogenización del fondo. La imagen de fondo se obtiene mediante el registro de un número representativo de imágenes antes del inicio de la inyección, con el posterior cálculo de la imagen media. Tanto el cálculo de la imagen media como la posterior sustracción se realizan píxel a píxel; siguiendo la ecuación 5.7, el valor de nivel digital $f_{S_r}(x, y)$ del píxel de coordenadas (x, y) de la imagen resultante, es la relación entre los niveles digitales de una imagen con chorros $f_{S_0}(x, y)$ y de la media de los fondos $f_B(x, y)$. El valor constante observado en la expresión matemática, tiene como función evitar valores negativos y se estima como el valor medio aproximado del rango dinámico de la imagen. En este caso se ha elegido arbitrariamente el valor de 2000, ya que se trabaja con imágenes de 12 bits, con 4096 niveles.

$$f_{S_r}(x, y) = f_{S_0}(x, y) - f_B(x, y) + 2000 \quad (5.7)$$

$$f_{S_r}(x, y) = f_B(x, y) - f_{S_0}(x, y) + 2000$$

La primera parte de la expresión corresponde a la ecuación 4.3 del capítulo anterior. No obstante, si el chorro es más oscuro que el fondo como sucede para los casos de transmisión y doble paso en la configuración centrada, el resultado de la sustracción será una imagen con una población muy alta de píxeles con niveles digitales bajos e incluso negativos. Es por este motivo, que para este tipo de imágenes la sustracción se lleva a cabo utilizando la segunda expresión de la ecuación. Una expresión similar fue propuesta por Palomares [35] para las imágenes de iluminación trasera difusa.

Como ejemplo se presenta la figura 5.34 correspondiente a una de las imágenes de doble paso en la configuración centrada. Nótese en este caso como el fondo se oscurece mientras la distribución de los niveles digitales del chorro cambia adquiriendo una forma más simétrica. Aunque el histograma que acompaña la imagen resultante corresponde a uno de los sectores de la imagen, el mismo sector al que corresponde el histograma superior de la figura 5.32, este es el patrón esperado de los histogramas de este tipo de imágenes: un máximo característico cercano al valor constante de la ecuación 5.7 correspondiente al fondo, y un segundo pico en niveles superiores correspondiente al chorro. El mínimo entre crestas, corresponde a un nivel digital con una población pobre de píxeles mostrando una superposición igualmente pequeña entre las distribuciones.

A diferencia del caso anterior, para el caso descentrado las variaciones en el patrón de forma de los histogramas de las imágenes resultantes son mínimas. El motivo es la presencia de los dos grupos de niveles digitales que conforman

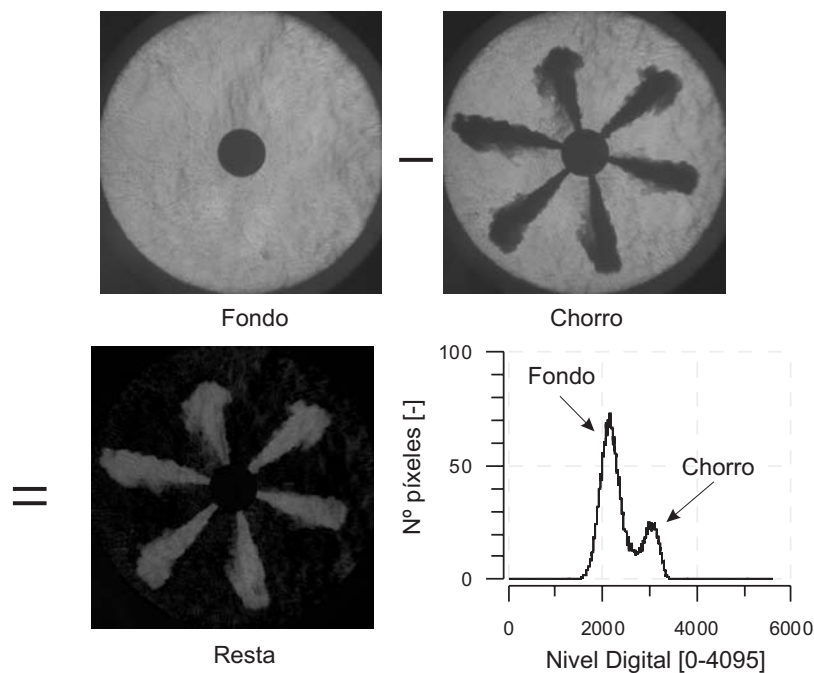


Figura 5.34: Producto de la sustracción de una imagen media de fondos (imágenes sin chorro) a una imagen con chorros, adquirida en la configuración centrada, para la homogenización del fondo y normalización de las distribuciones.

el chorro y que se reparten los píxeles disminuyendo la población de las distribuciones. En el histograma siempre existirá un valor máximo correspondiente a la distribución fondo y las distribuciones de las componentes del chorro se desarrollarán a ambos lados de la de fondo sin una forma claramente identificable.

Como ejemplo en la figura 5.35 se puede observar la sustracción para un caso con un alto nivel de ensuciamiento. Además de la deposición en la periferia del área visible, se observa un reflejo intenso al lado derecho del inyector. Con la sustracción, estos patrones de ruido casi desaparecen observándose un fondo más homogéneo que se traduce en una distribución más simétrica. Ya que los fondos originales de las imágenes descentradas tienen niveles digitales bajos, la probabilidad de alcanzar resultados negativos en la sustracción es menor al caso centrado, por lo que será más fácil la aplicación de la primera expresión de la ecuación 5.7.

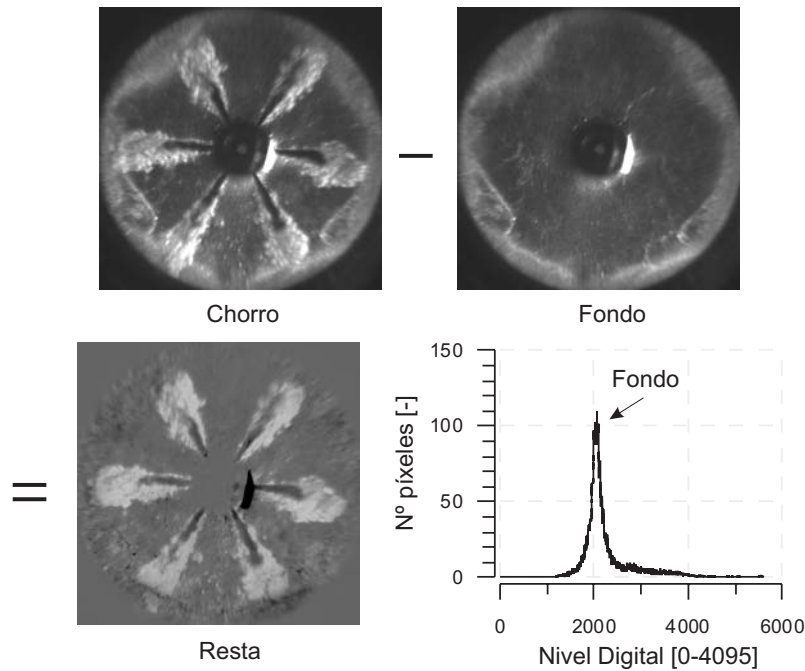


Figura 5.35: Homogenización del fondo y minimización del efecto de la deposición de combustible en la ventana mediante la sustracción de una imagen media de fondo a la imagen de chorro con $\alpha = 1.8^\circ$.

5.4.3. Segmentación: adaptación del algoritmo 1D-LRT

Los algoritmos para la segmentación son una adaptación del LRT, ecuación 4.17, propuesto en el capítulo anterior para el procesado de las imágenes de chorro líquido. Debido a las características de las imágenes se debe hablar de dos tipos de histogramas según la configuración óptica y por lo tanto del número de clases del sistema de selección: por un lado el algoritmo para la segmentación de las imágenes de transmisión y doble paso centrado con las clases chorro oscuro y fondo claro, y las imágenes de doble paso descentrado con el chorro conformado por dos grupos diferentes de nivel digital.

a. Imágenes de transmisión y doble paso centrado

Comparando los histogramas del primer grupo (chorro oscuro) antes de la sustracción con los de chorro líquido, se observa una leve similitud, aunque la correspondencia de la distribución poco dispersa en este caso pertenece al

chorro. Con la sustracción, la forma de las distribuciones cambia y se observan formas más simétricas y suaves fácilmente caracterizables con las funciones de probabilidad normales PDF_N , tanto para la clase fondo $p_B(x)$ como para la clase chorro $p_S(x)$. El desarrollo del algoritmo para este tipo de distribuciones se puede observar en la ecuación 4.18 y se expresa como:

$$\frac{(T - \mu_B)^2}{2\sigma_B^2} - \frac{(T - \mu_S)^2}{2\sigma_S^2} + \ln\left(\frac{\sigma_B P_S}{\sigma_S P_B}\right) = 0 \quad (5.8)$$

donde T es el umbral óptimo de segmentación y μ y σ los parámetros estadísticos de las funciones de distribución PDF_B y PDF_S , fondo y chorro respectivamente.

El algoritmo fue desarrollado e implementado en trabajos previos para el procesado de imágenes de chorro líquido, con características similares, adquiridas con la metodología de iluminación trasera difusa [35, 36].

La estimación estadística se lleva a cabo de manera similar a la de los histogramas de chorro líquido de este mismo trabajo: se identifica el máximo característico de la distribución el cual pertenece al fondo y se calculan los parámetros característicos de las distribuciones a partir del cálculo de un umbral de selección a priori T_{ap} (ver § 4.3.2).

b. Imágenes de doble paso descentrado

Con el aumento del número de clases del sistema de selección en la segmentación de las imágenes de doble paso descentrado, se aumenta la extensión de la función de probabilidad incondicional (ecuación 4.5) y con ello la dimensionalidad del test. Si el histograma es la suma de las funciones de densidad de probabilidad características de cada clase, la ecuación queda expresada por las clases fondo (B) y las dos regiones del chorro S_1 y S_2 :

$$p(x) = p_{S_1}(x)P_{S_1} + p_B(x)P_B + p_{S_2}(x)P_{S_2}$$

No obstante, de las observaciones realizadas a los histogramas después de la sustracción, es posible dividirlos en dos sistemas simples de selección de dos clases caracterizados por funciones de densidad normal. Observándose la forma simétrica de la distribución del fondo y la gran dispersión de las distribuciones del chorro, se calcula la función de densidad normal del fondo PDF_B a partir de los puntos de máxima frecuencia del histograma. El nivel máximo es la media del fondo μ_B y el punto de separación entre los sistemas de selección:

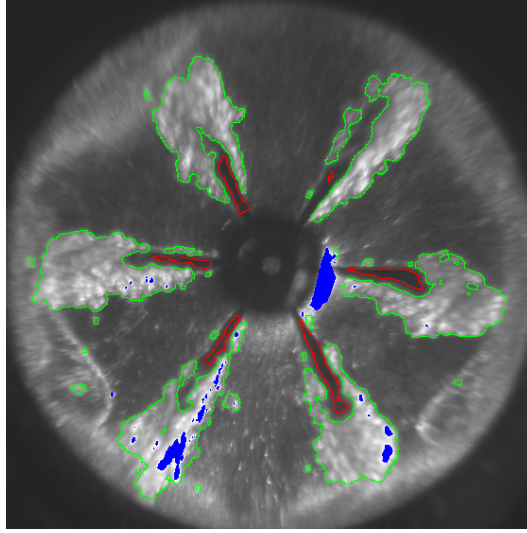


Figura 5.36: Ejemplo de la segmentación de imágenes de tres clases. Se superponen a los chorros, los contornos calculados para cada una de las regiones que los conforman: en rojo la oscura y en verde la luminosa. En azul las zonas saturadas.

a izquierda para la segmentación de la región oscura del chorro y a derecha para la región iluminada.

Con dos sistemas de selección se calculan dos diferentes niveles digitales que serán los umbrales óptimos (T_1 y T_2) de separación entre las clases:

$$\frac{(T_1 - \mu_B)^2}{2\sigma_B^2} - \frac{(T_1 - \mu_{S_1})^2}{2\sigma_{S_1}^2} + \ln \left(\frac{\sigma_B P_{S_1}}{\sigma_{S_1} P_B} \right) = 0$$

$$\frac{(T_2 - \mu_{S_2})^2}{2\sigma_{S_2}^2} - \frac{(T_2 - \mu_B)^2}{2\sigma_B^2} + \ln \left(\frac{\sigma_{S_2} P_B}{\sigma_B P_{S_2}} \right) = 0$$
(5.9)

El problema añadido a la segmentación de chorros de dos zonas, es la superposición de la distribución del fondo a la región de transición del chorro. Esto supone un error en el proceso de segmentación que, como se puede apreciar en la imagen de la figura 5.36, se manifiesta con una aparente subestimación de la región oscura del chorro. Este inconveniente se puede superar con la implementación de algoritmos de post-procesado para unir las dos regiones segmentadas de las imágenes binarias.

c. Consistencia de los resultados según la configuración

La validación de la consistencia del método de procesado se llevó a cabo mediante la comparación de los resultados de ángulo y penetración para las dos

configuraciones extremas en doble paso ($\alpha = 0^\circ$ y $\alpha = 1.8^\circ$). Los resultados, que se presentan en la figura 5.37, corresponden a las medidas obtenidas para los diferentes casos de la tabla 5.1. De cada caso, se muestran los resultados medios de cada uno de los chorros de las 5 repeticiones de un mismo instante de tiempo ASOI (el mismo para cada uno de los casos). El punto de valor medio, corresponde a la media resultante entre los diferentes chorros de un mismo caso.

En ambas medidas, los resultados obtenidos con las diferentes configuraciones, indican pequeñas diferencias de hasta un milímetro en la penetración y hasta 4° en el ángulo. Estas diferencias pueden ser atribuibles a la dispersión entre chorros y entre las diferentes exposiciones de un mismo instante de tiempo; se debe recordar que cada imagen corresponde a una inyección independiente. Esta afirmación se confirma con el valor medio entre todos los chorros de las 5 repeticiones quienes muestran una similitud bastante ajustada.

5.4.4. Post-procesado

El posterior análisis de las imágenes binarias fruto de la segmentación, se lleva a cabo de manera similar al de las imágenes de chorro líquido: eliminación de ruido, determinación del contorno, reescalado, caracterización geométrica, etc. Las principales variantes en los algoritmos se encuentran en el análisis de las imágenes de la configuración descentrada de doble paso debido a la

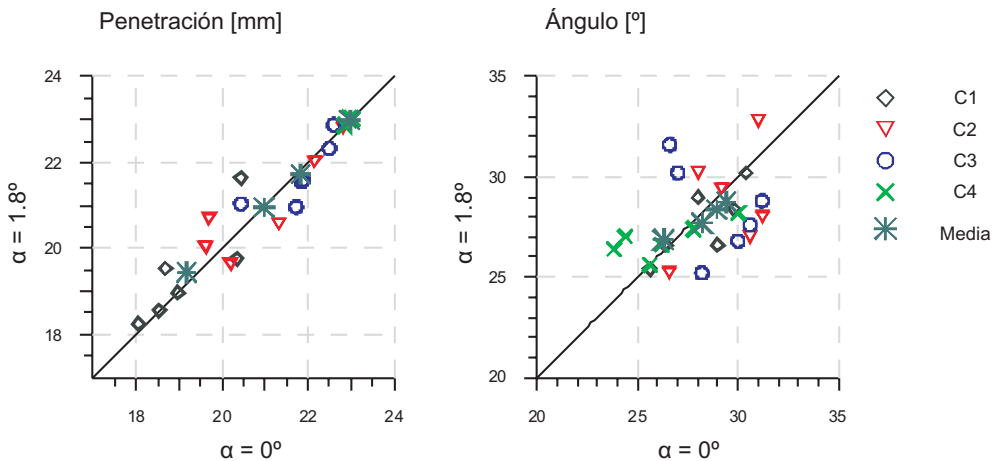


Figura 5.37: Comparación entre las medidas de penetración y ángulo medios de cinco imágenes adquiridas para un mismo tiempo ASOI, con la configuración de doble paso de los casos C1 a C4 y con $\alpha = 0^\circ$ y $\alpha = 1.8^\circ$.

presencia de las dos regiones del chorro.

En la caracterización de las imágenes de transmisión, las medidas realizadas fueron:

- El ángulo de apertura del chorro, definido como el ángulo formado por las dos rectas de regresión del ajuste por mínimos cuadrados al 45 % de los primeros puntos del contorno.
- La penetración del chorro sobre los puntos del frente del contorno alrededor del eje corregido que se define como la bisectriz de las rectas de regresión ajustadas a la parte superior e inferior del contorno.

En la variante de doble paso, especialmente en la configuración descendida, la forma atípica de los chorros y la subestimación de la región oscura llevó al planteamiento de pequeñas variantes en los algoritmos. Se adicionó una subrutina cuyo objetivo fue integrar las dos regiones de las imágenes binarias segmentadas con T_1 y T_2 . La integración se realiza mediante la determinación de los puntos extremos de la imagen binaria en cada punto del eje.

5.5. Resumen y conclusiones

Las técnicas de Schlieren y Shadowgraph son dos metodologías que debido a su alta sensibilidad facilitan la visualización de fenómenos que de otra manera serían difíciles de observar. Estas interpretan pequeños cambios de fase de la onda electromagnética al propagarse por un medio ópticamente heterogéneo, convirtiéndolos en diferencias de intensidad fácilmente registradas por los sistemas de adquisición. Las perturbaciones de la radiación son debidas a cambios locales en el índice de refracción de los fluidos por los gradientes de presión y temperatura, mezcla de sustancias, etc. En el campo de los MCIAs, su implementación ha sido importante para la visualización y estudio de fenómenos como la evaporación de combustible y las reacciones químicas del proceso de combustión. Por sus características de bajo coste y relativa simplicidad, se evaluaron las posibilidades de aplicación a las instalaciones con las que cuenta el departamento.

En el proceso de implementación, se realizó un estudio detallado de los principios físicos de funcionamiento de las técnicas, centrando la atención en los factores que afectan la sensibilidad y las posibilidades de configuración óptica. Para optimizar la configuración, se realizó un estudio fuera de motor teniendo en cuenta las características de accesibilidad óptica de las diferentes

instalaciones en donde podría llevarse a cabo la visualización: maquetas iso-termas (SF_6 y N_2) y el motor maqueta provisto con dos diferentes culatas, una para visualización de toberas mono-orificio con varios accesos y otra para la visualización de toberas de múltiples orificios con acceso único.

En la definición de la configuración óptica se resolvió trabajar con sistemas de doble lente para el colimado y enfoque del haz, debido a la mayor flexibilidad de espacio que se puede lograr en las dos variantes aquí definidas:

- Transmisión: para la visualización en instalaciones con múltiples accesos.
- Doble paso: para el estudio de toberas de múltiples orificios en la instalación con acceso único.

Con la primera de las variantes, se registraron imágenes de ondas de presión en la maqueta de hexafluoruro cuyas principales características fueron la ausencia de ruido de fondo y una gran resolución temporal. Esta última propiedad, sería útil en la visualización más precisa de chorros líquidos en los primeros instantes de tiempo cuando el chorro penetra con mayor velocidad; con los métodos habituales los registros son de aproximadamente $20 \mu\text{s}$ comparado con la resolución temporal de $0,1 \mu\text{s}$ alcanzada en la visualización por transmisión (obturación mínima del sistema de adquisición). Con los nuevos desarrollos observados en sistemas de adquisición de última generación, sería posible alcanzar tiempos de exposición aun menores, siempre que los niveles de intensidad de la radiación lo permitieran. Por problemas de ensuciamiento de los accesos ópticos por deposición de combustible, no fue posible repetir la experiencia en la instalación de la maqueta de nitrógeno.

En imágenes adquiridas en motor con la misma variante de transmisión, se observó la presencia de ruido de fondo por la turbulencia del gas y la presencia de gradientes de presión y temperatura dentro de la cámara de combustión. Con el aumento de la sensibilidad del instrumento, mediante disminución del tamaño de la fuente radiante, y con ello, el aumento de la profundidad de campo de la zona de enfoque, el ruido se hace crítico afectando negativamente el contraste chorro-fondo, y por lo tanto, los resultados del procesado automático de las imágenes. Por otro lado, diferentes niveles de filtrado en el plano de Fourier, solo permitieron observar cambios en la intensidad del fondo sin modificaciones importantes en los niveles digitales del chorro.

La presencia de un chorro oscuro en las imágenes, para las diferentes configuraciones de filtrado, difiere de las observaciones realizadas en los estudios preliminares con chorro de aire comprimido; en estos últimos se observó la presencia de dos diferentes tipos de información, una con niveles de radiación altos

y otras con ausencia de ellos. Este fenómeno se observa ya que los gradientes de índice de refracción son diferentes para los dos chorros; la presencia de la fase vapor del chorro Diesel, produce una mayor refracción de la radiación por lo que ésta sale del sistema de lentes y no es registrada por los fotorreceptores.

En la variante de doble paso, un estudio en el desalineamiento controlado del haz radiante respecto al eje óptico del instrumental, confirmó la afirmación anterior. Para el estudio se definieron diferentes niveles de descentrado y se diseñó una pequeña matriz con dos diferentes temperaturas y presiones en la cámara de combustión. En todos los casos con el sistema centrado, el chorro fue una única sombra con una pequeña dispersión de los niveles digitales, similar a las imágenes que se registran con la técnica de iluminación trasera difusa para chorro líquido. Por el contrario, en la configuración descentrada, el chorro Diesel presenta unas características similares a las de chorro de aire comprimido: región luminosa y región oscura. La distribución de estas zonas del chorro en la imagen, varía según el grado de evaporación. No obstante, por el propio fundamento de la técnica de medida, no es posible la determinación de una frontera clara entre las fases líquido y vapor.

Los algoritmos propuestos para el procesado de las imágenes, han tenido como base los presentados en el capítulo anterior para el análisis de imágenes de chorro líquido. Debido a las diferencias entre las imágenes, fue necesario realizar un estudio de las características de los perfiles de los histogramas, observándose la necesidad de realizar la sustracción de la imagen de fondo. En todos los casos, la segmentación se llevó a cabo con el algoritmo 1D-LRT para distribuciones normales. Para el caso de imágenes adquiridas en la variante de transmisión y doble paso en la configuración centrada, no se requirió realizar modificaciones. No obstante, el procesado de los chorros de la configuración descentrada fue más complejo por la presencia de los tres grupos de nivel digital: regiones iluminadas, oscuras y la zona de transición con niveles digitales similares a los del fondo.

Para simplificar el proceso de segmentación de las imágenes de tres clases, se optó por analizar el problema como un sistema de selección doble de dos clases cada uno: chorro iluminado-fondo y chorro oscuro-fondo. Mediante el análisis de los histogramas, se determinó la distribución casi simétrica del fondo como la distribución común entre los sistemas de clases divididos por el valor de la media. Debido a los niveles digitales de la zona de transición, similares a los de fondo, se observó una aparente subestimación de la región oscura, motivo por el cual fue necesario recurrir a la implementación de algoritmos de post-procesado que unieran las dos regiones segmentadas.

Si bien, para las diferentes configuraciones de descentrado se consiguió pro-

cesar apropiadamente las imágenes, la superposición de las distribuciones de chorro y fondo, por el menor contraste entre clases, dificultó el cálculo del contorno. El procesado más cómodo se observó para las imágenes en las cuales el chorro es oscuro por el filtrado de la radiación difractada (frecuencias altas en la transformada). Aunque, en la configuración descentrada, la presencia de la región iluminada en el chorro podría ser útil como indicador a priori del grado de evaporación, éste no determine la frontera de separación entre las fases líquido y vapor. Las propias características de las imágenes (que parecen muy intuitivas con una zona brillante donde parece que sólo existe vapor y una zona oscura donde parece razonable pensar que el chorro es líquido), puede dar lugar a errores serios de interpretación por un observador ajeno a las peculiaridades y fundamentos de la técnica.

La recomendación que se deriva de este trabajo para la realización de estudios sistemáticos es emplear la configuración centrada, con filtrado o sin el, ya que el procesado automático de las imágenes es más sencillo y fiable.

Bibliografía

- [1] Goldstein R.J. y Kuehn T.H. *Fluid mechanics measurement. Optical systems for flow measurement: shadowgraph, schlieren and interferometric techniques*. Taylor and Francis, 2nd ed., ISBN 1-56032-306-X, 1996.
- [2] van de Hulst H.C. *Light scattering by small particles*. Dover Publications, Inc., ISBN 0-486-64228-3, 1957.
- [3] Settles G.S. *Schlieren and shadowgraph techniques: Visualizing phenomena in transparent media*. Springer-Verlag, ISBN 3-540-66155-7, 2001.
- [4] Paulsen H. y Valland H. “A new method for time-resolved full-field measurement of local average gas concentration during fuel-injection”. *SAE paper 960829*, 1996.
- [5] Merzkirch W. *Flow visualization*. Academic Press, 2nd ed., ISBN 0-12-491351-2, 1987.
- [6] Moore D.T. “Gradient-index optics: a review”. *Applied Optics*, Vol. 19, pp. 1035–1038, 1980.
- [7] Kogelschatz U. y Schneider W.R. “Quantitative schlieren techniques applied to high current arc investigations”. *Applied Optics*, Vol. 11, pp. 1822–1832, 1972.
- [8] Holman J.P. *Experimental methods for engineers*. McGraw-Hill, Inc., 7th ed., ISBN 0-07-366055-8, 2001.
- [9] Naber J.D. y Siebers D.L. “Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays”. *SAE paper 960034*, 1996.
- [10] Kunkulagunta K.R. “Video imaging and analysis of common rail sprays in an optical engine using shadowgraphy technique”. *SAE paper 2000-01-1255*, 2000.
- [11] Karpen V., Thomsen L. y Suess E. “A new ‘schlieren’ technique application for fluid flow visualization at cold seep sites”. *Marine Geology*, Vol. 204, pp. 145–159, 2004.
- [12] Schmalzing C.O., Stapf P., Maly R.R., Renner G., Stetter H. y Dwyer H.A. “A holistic hydraulic and spray model—Liquid and vapor phase penetration of fuel sprays in D. I. diesel engines”. *SAE paper 1999-01-3549*, 1999.

- [13] MacPhee A.G., Tate M.W., Powell C.F., Yue Y., Renzi M.J., Ercan A., Narayanan S., Fontes E., Walther J., Schaller J., Gruner S.M. y Wang J. “X-ray imaging of shock waves generated by high-pressure fuel sprays”. *Science*, Vol. 295, pp. 1261–1263, 2002.
- [14] Kleine H., Grönig H. y Takayama K. “Simultaneous shadow, schlieren and interferometric visualization of compressible flows”. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44, pp. 170–189, 2006.
- [15] Ouchi H., Chikahisa T. y Murayama T. “A quantitative analysis of schlieren photography for an internal combustion engine diagnostics”. *SAE paper 910730*, 1991.
- [16] Shiozaki T., Suzuki T. y Shimoda M. “Observation of combustion process in D. I. diesel engine via high speed direct and schlieren photography”. *SAE paper 800025*, 1980.
- [17] Yamaguchi I., Nakahira T., Komori M. y Kabayashi S. “An image analysis of high speed combustion photographs for D. I. diesel engine with high pressure fuel injection”. *SAE paper 901577*, 1990.
- [18] Zhao H. y Ladommatos N. *Engine combustion instrumentation and diagnostics*. Society of Automotive Engineers, ISBN 0-7680-0665-1, 2001.
- [19] Smallwood G.J. y Gülder Ö.L. “Views on the structure of transient diesel sprays”. *Atomization and sprays*, Vol. 10, pp. 355–386, 2000.
- [20] Fuller R.P., Wu P.K. y Kirkendall K.A. “Effects of injection angle on atomization of liquid jets in transverse airflow”. *AIAA Journal*, Vol. 38, pp. 64–72, 2000.
- [21] Siebers D.L. “Liquid-phase fuel penetration in diesel sprays”. *SAE paper 980809*, 1998.
- [22] Verhoeven D., Vanhemelryck J-L. y Baritaud T. “Macroscopic and ignition characteristics of High-Pressure sprays of single-component fuels”. *SAE paper 981069*, 1998.
- [23] Myong K., Arai M., Suzuki H., Senda J. y Fujimoto H. “Vaporization characteristics and liquid-phase penetration for multi-component fuels”. *SAE paper 2004-01-0529*, 2004.
- [24] Bougie B., Tulej M., Dreier T., Dam N.J., Meulen J.J. Ter y Gerber T. “Optical diagnostics of diesel spray injections and combustion in a high-pressure high-temperature cell”. *Applied Physics B*, Vol. 80, pp. 1039–1045, 2005.

-
- [25] Tennison P.J., Georjon T.L., Farrell P.V. y Reitz R.D. “An experimental and numerical study of sprays from a common rail injection system for use in an HSDI diesel engine”. *SAE paper 980810*, 1998.
- [26] Tani Y., Saito A. y Yamada M. “Visualization of the evaporating process of the fuel spray in the cylinder of a diesel engine”. *JSME International Journal, Series II*, Vol. 32, pp. 673–678, 1989.
- [27] Shiozaki T., Nakajima H., Yokota H. y Miyashita A. “The visualization and its analysis of combustion flame in DI diesel engine”. *SAE paper 980141*, 1998.
- [28] Hiroyasu H. y Arai M. “Structures of fuel spray in diesel engines”. *SAE paper 900475*, 1990.
- [29] Nakahira T., Komori M., Nishida M. y Tsujimura K. “The shock wave generation around the diesel fuel spray with high pressure injection”. *SAE paper 920460*, 1992.
- [30] Milton B.E. y Pianthong K. “Pulsed, supersonic fuel jets—A review of their characteristics and potential for fuel injection”. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 26, pp. 656–671, 2005.
- [31] Arrègle J. *Análisis de la estructura y dinámica interna de chorros diesel*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1997.
- [32] Juliá J.E. *Medida de concentraciones de combustible en chorros diesel mediante técnicas de fluorescencia inducida por láser*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003.
- [33] Payri F., Desantes J.M. y Arrègle J. “Characterization of D.I. diesel sprays in high density conditions”. *SAE paper 960774*, 1996.
- [34] Zakrzewski S., Milton B.E., Pianthong K. y Behnia M. “Supersonic liquid fuel jets injected into quiescent air”. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp. 833–840, 2004.
- [35] Palomares A. *Análisis de imágenes de chorros diesel*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2001.
- [36] Pastor J.V., Arrègle J. y Palomares A. “Diesel spray image segmentation with a likelihood ratio test”. *Applied Optics*, Vol. 40, pp. 1–10, 2001.

- [37] Weber J., Spiekermann P. y Peters N. “Model calibration for spray penetration and mixture formation in high pressure fuel spray using a micro-genetic algorithm and optical data”. *SAE paper 2005-01-2099*, 2005.
- [38] Desantes J.M., Pastor J.V., García-Oliver J.M. y Pastor J.M. “A 1D model for the description of mixing-controlled reacting diesel sprays”. *Combustion and Flame*, Vol. 156, pp. 234–249, 2009.
- [39] Pastor J.V., García J.M., Pastor J.M. y Zapata L.D. “Evaporating diesel spray visualization using a double-pass shadowgraphy/schlieren imaging”. *SAE paper 2007-24-0026*, 2007.
- [40] Martínez S. *Desarrollo de una instalación experimental para el estudio de chorros diesel evaporados en atmósfera inerte y reactiva*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003.
- [41] García J.M. *Aportaciones al estudio del proceso de combustión turbulenta de chorros en motores diesel de inyección directa*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2004.
- [42] Russ J.C. *The image processing handbook*. CRC press, 3rd ed., ISBN 0-8493-2532-3, 1998.
- [43] González R.C. y Woods R.E. *Digital image processing*. Prentice Hall, 2nd ed., ISBN 0-201-18075-8, 2002.

Capítulo 6

Visualización de los procesos de combustión Diesel

Contenido

6.1. Introducción	229
6.2. Metodología de visualización	230
6.2.1. Emisión de radiación natural	230
6.2.2. Configuración para la visualización de la combustión	231
6.2.3. Análisis de sensibilidad del método de visualización	236
6.3. Procesado de las imágenes	247
6.3.1. Algoritmos de procesado	249
6.4. Resumen y conclusiones	256
Bibliografía	258

6.1. Introducción

Los métodos de visualización utilizados en el estudio de los procesos de autoencendido y combustión Diesel, se basan en el registro de la radiación emitida por algunas especies resultantes de las reacciones químicas presentes en determinados instantes del proceso. Estas metodologías se pueden clasificar según el tipo de radiación que se registra con los sistemas de adquisición: las que registran la radiación fruto de la interacción radiación-materia entre la especie estudiada y una fuente externa (generalmente tipo láser), y los que visualizan la emisión de radiación natural quimioluminiscente o incandescente. En el primer grupo el proceso de visualización es más complejo requiriendo un equipamiento más sofisticado y sólo suelen ser aplicables en entornos experimentales simplificados. Gracias a la direccionalidad de la radiación permiten la generación de láminas láser y, por tanto, la medida detallada en planos tomográficos del chorro o llama. Aunque la información que aportan resulta muy útil para la validación de modelos y códigos de cálculo CFD, se suele requerir varios accesos ópticos ortogonales para su implementación. En el segundo grupo, el equipamiento es menos sofisticado pero permite obtener una visión global del proceso en condiciones más realistas. En ocasiones estas técnicas han sido utilizadas con dispositivos ópticos miniaturizados como fibras ópticas con las cuales se ha podido acceder al interior de la cámara de combustión de motores reales.

En el presente capítulo, el estudio del autoencendido y combustión se ha llevado a cabo mediante el registro de la emisión natural de la quimioluminiscencia de los radicales CH y OH y la emisión de radiación térmica del hollín. Por la naturaleza de las técnicas, ha sido posible su implementación en el estudio de toberas reales tanto en la instalación de motor maqueta como en la del motor óptico transparente. En la definición de la configuración optoelectrónica se ha hecho uso de la experiencia adquirida en el estudio por visualización de toberas de orificio único. No obstante, las características de las imágenes varían significativamente por lo que los algoritmos de procesado son igualmente diferentes.

El trabajo, que aquí se expone, incluye la descripción de la configuración para la visualización y la definición de los algoritmos desarrollados para el procesado digital de las imágenes. Tras una descripción temporal de los eventos de autoencendido y combustión, se evalúa la sensibilidad del método de visualización según las características y configuración de los sistemas de adquisición de imagen.

6.2. Metodología de visualización

Los métodos de visualización más sencillos desde el punto de vista experimental se basan en el registro de la radiación natural presente en los procesos de autoencendido y combustión. Si la radiación tiene niveles de intensidad altos y su rango de emisión se encuentra dentro del espectro visible, su registro se puede llevar a cabo con sistemas de adquisición convencionales como los provistos con sensores CCD y CMOS. Por el contrario, si la radiación es de origen luminiscente, con niveles de intensidad muy inferiores a los de la incandescencia, se requerirán sistemas provistos de intensificador. Ya que se registran las emisiones procedentes de las reacciones químicas del proceso de combustión, no son necesarias fuentes externas de iluminación. No obstante, es importante contar con una óptica adecuada, especialmente en los procesos quimioluminiscentes, como lentes que transmitan además en el espectro ultravioleta (UV) y filtros especiales para la selección de determinadas longitudes de onda.

6.2.1. Emisión de radiación natural

Para la correcta interpretación de las imágenes es importante conocer qué reacciones generan la radiación y cuál es su naturaleza. De esta forma, si la combustión se visualiza con sistemas convencionales, las imágenes serán predominantemente de incandescencia. Sin filtrado, estas imágenes suelen presentar un color anaranjado con emisión en un amplio rango de longitudes de onda en el espectro visible e infrarrojo cercano. Esta radiación aparece momentos antes del inicio de la fase de combustión por difusión, según se define de la ley de liberación de calor de la figura 2.1. Si la llama incandescente se estudia como una nube de pequeñas partículas a alta temperatura, la intensidad y rango de emisión de la radiación dependerá de la concentración y temperatura del hollín [1]. Luego si se registra simultáneamente la radiación emitida en dos longitudes de onda (λ), se podrá realizar una estimación de la temperatura de llama y la concentración del hollín. De este método, conocido como de dos colores, se puede encontrar amplia información en [2, 3].

En la misma etapa en la cual se observa la incandescencia, los radicales OH dominan en las regiones donde se presentan condiciones de alta temperatura, es decir, en el frente de llama o en regiones con combustión estequiométrica [4]. Este radical está relacionado con la frontera de reacción, envolviendo las zonas pobres en O_2 que favorecen la formación del hollín. No obstante, según Dec y Coy [5] la región tiene un espesor de solo $120 \mu\text{m}$ por lo que es posible encontrarse diferentes definiciones de la frontera de reacción según se visualice

la señal de incandescencia o de quimioluminiscencia de OH. La emisión de quimioluminiscencia del OH es de baja intensidad y se centra en $\lambda=310\text{nm}$ [6], por fuera del rango de emisión del hollín incandescente. Esto permite, con el filtrado apropiado y el uso de equipos intensificados, visualizar durante todo el proceso de combustión. Uno de los parámetros que puede determinarse a partir de la visualización de la quimioluminiscencia del OH y que suele ser útil para el estudio de las llamas de difusión es la longitud de lift-off (LOL), que marca la frontera en el chorro entre las fases inerte y reactiva en las proximidades de la tobera de inyección [7, 8].

Además del registro de la radiación de $\lambda = 310 \text{ nm}$, en un proceso de combustión Diesel, se suele visualizar la quimioluminiscencia de las especies C_2 y CH con rangos de emisión centrados en 517 nm y 432 nm, respectivamente [6, 9]. Estas son las que mayor intensidad presentan en el proceso de autoencendido [10, 11], facilitando el estudio del proceso por simple análisis de imágenes. La visualización se realiza con sistemas intensificados y filtros interferenciales adecuados hasta el momento en que aparece la radiación térmica del hollín. Esta última, de mayor intensidad, se superpone a la señal de quimioluminiscencia en el mismo rango espectral.

6.2.2. Configuración experimental para el estudio de la combustión mediante visualización

La definición o elección de la configuración optoelectrónica más apropiada para un determinado estudio está fuertemente influenciada por el tipo y número de accesos ópticos de la instalación donde se realiza la experimentación y por las características de los sistemas de adquisición de imágenes.

Los primeros trabajos de visualización de la combustión realizados en el grupo CMT se llevaron a cabo a principios de los años 90's en motores monocilíndricos de hasta dos litros de cilindrada, representativos de los motores utilizados para transporte pesado por carretera. El acceso óptico a la cámara de combustión se realizó a través de la culata permitiendo la visualización mediante endoscopios de reducido diámetro refrigerados por aire. Como sistema de filmación se utilizó una cámara cinematográfica de alta velocidad, filmando el proceso de inyección y combustión a 10000 imágenes por segundo en películas de 16 mm y utilizando como fuente de iluminación un flash de magnesio de unos 3 ms de duración, lo que permitía la iluminación externa del chorro antes de la combustión pero únicamente para un ciclo por ensayo [12]. Con el fin de evitar el ensuciamiento de las ventanas, el número de orificios del inyector se redujo a dos, orientándose el endoscopio para permitir la visualización de uno

de los chorros. Evidentemente, las posibilidades de procesado eran muy limitadas, reduciéndose al estudio topológico de la evolución de la combustión y la caracterización temporal de los eventos en distintas condiciones operativas.

Estudios más detallados con acceso por endoscopía se realizaron posteriormente en un motor EURO III de 1.8 litros de cilindrada unitaria equipado con sistema de inyección Common-Rail. Como sistema de filmación se utilizó una cámara CCD y como fuente externa para la iluminación del chorro se usó una lámpara estroboscópica de Xenón cuya luz era guiada a la ventana de acceso a través de un haz de fibras ópticas incoherente. Dado que la cámara permitía la adquisición de únicamente una imagen por inyección, el número de orificios del inyector se limitó también a dos para minimizar el ensuciamiento de la ventana y permitir una visión razonable de uno de los chorros evitando cualquier solape con otros chorros. Un análisis detallado de cómo afectaban estas modificaciones al desarrollo de la combustión se presenta en [13].

En cualquiera de estas configuraciones, la única radiación registrable del proceso de combustión era la incandescencia del hollín, y la precisión del procesado topológico se veía limitada por la necesidad de realizar correcciones geométricas asociadas a la elevada distorsión introducida por los endoscopios y a la perspectiva del campo visualizado. Algunos resultados de estos trabajos pueden encontrarse en Palomares [14], Desantes *et al.* [15] y posteriormente García [2], González [16] y Benajes *et al.* [17].

La disponibilidad de instalaciones experimentales con mayores accesos ópticos y de equipamiento de adquisición de imágenes más avanzado, ha abierto el abanico de posibilidades de estudio. En los párrafos siguientes se describen las dos configuraciones básicas más utilizadas para los estudios de visualización del autoencendido y combustión Diesel. Cada una de ellas ofrece distintas posibilidades y limitaciones de análisis, y su elección depende fundamentalmente de los objetivos del estudio.

Configuración experimental para el estudio de la combustión de chorros aislados

La instalación del motor maqueta provisto con la culata de múltiples accesos, figura 3.8, se ha utilizado para la realización de múltiples estudios de combustión con toberas mono-orificio. El objetivo de los estudios realizados en esta configuración ha sido profundizar en el conocimiento del proceso de combustión por difusión como proceso físico-químico, mediante la realización de diferentes estudios paramétricos con distintas técnicas. La contribución del autor de esta tesis, que se detalla a lo largo del capítulo, ha sido la opti-

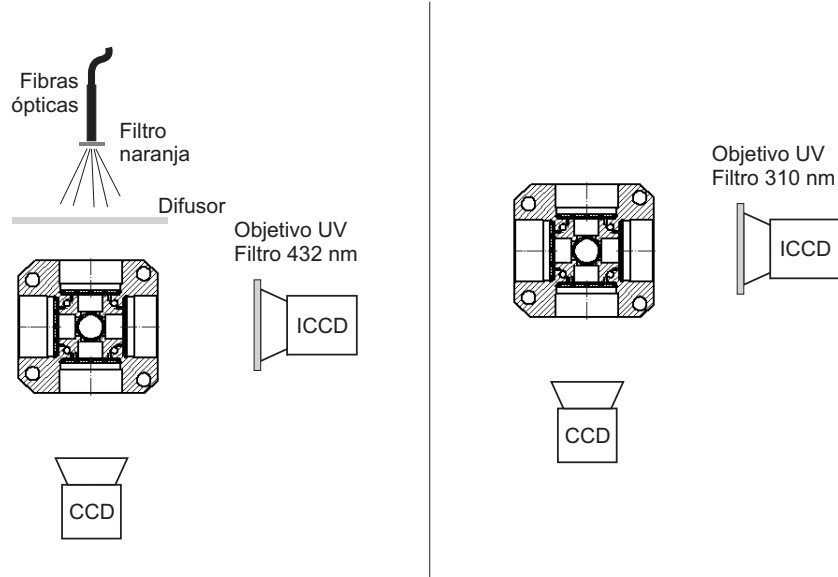


Figura 6.1: Distribución del instrumental óptico para la visualización simultánea de la inyección y combustión en motor maqueta con la culata de múltiples accesos (toberas de orificio único).

mización del dispositivo experimental para los objetivos particulares de cada estudio, empleando en la medida de lo posible las diferentes técnicas de forma simultánea, así como el desarrollo de los procedimientos y algoritmos de procesamiento de las imágenes.

Los esquemas de la figura 6.1 muestran, a modo de ejemplo, la configuración utilizada para estudios paramétricos de visualización de llamas de difusión de chorros aislados [18, 19]. En el esquema de la izquierda se visualiza simultáneamente la fase líquida del chorro mediante iluminación trasera difusa, como se detalla en § 3.2 utilizando las dos ventanas enfrentadas, y la quimioluminiscencia de los radicales CH en la fase de autoencendido a través del tercer acceso. Se utilizó un filtro de color naranja (OG-550 Schott) en la fuente de iluminación y un filtro interferencial centrado en 430 nm acoplado al objetivo de la ICCD. De esta forma, se aseguraba que la radiación detectada por la cámara intensificada procedía exclusivamente del proceso de autoencendido, sin que afectara el uso de la fuente de iluminación externa [7].

En el esquema de la derecha de la figura, se muestra la configuración para la adquisición simultánea de imágenes de quimioluminiscencia del OH, con la misma cámara ICCD y un filtro interferencial centrado en 310 nm, y de imágenes de incandescencia del hollín utilizando la cámara CCD sin filtros.

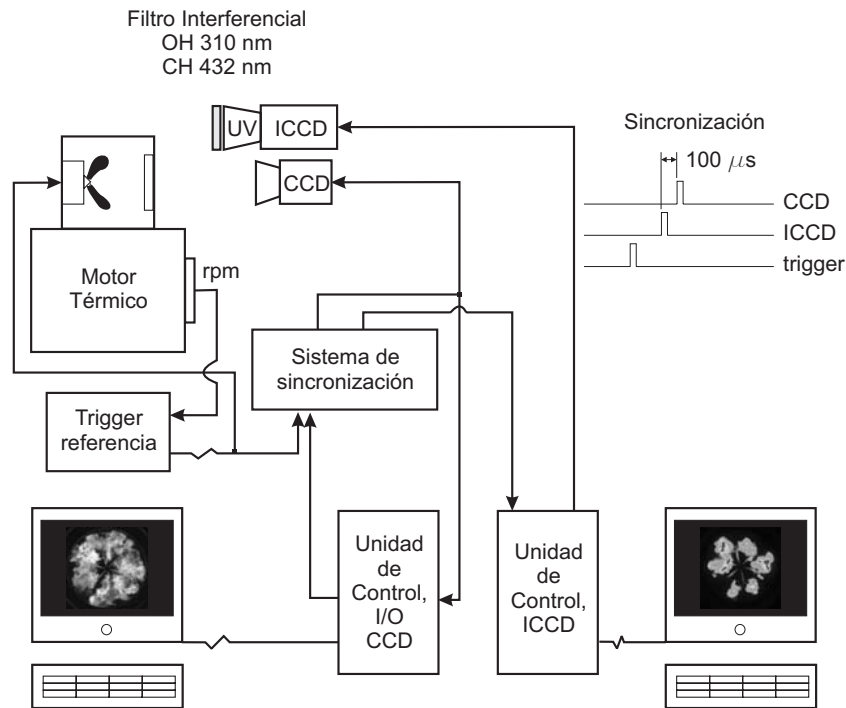


Figura 6.2: Configuración para la visualización de la emisión natural quimioluminiscente e incandescente de toberas reales en la instalación del motor maqueta.

La descripción de la secuencia temporal de eventos y los condicionantes a tener en cuenta para la correcta visualización se detallan en los apartados siguientes.

Configuración experimental para la visualización con toberas multi-orificio

La configuración para la visualización de toberas reales de múltiples orificios, que se esquematiza en la figura 6.2, se implementó en las instalaciones del motor maqueta provista con la culata para el estudio de toberas reales, figura 3.7, y del motor óptico transparente, figura 3.5. Los objetivos de los estudios realizados en esta configuración, se centran habitualmente en la comparación entre distintas configuraciones de sistemas de inyección, geometrías de tobera o tipos de combustibles, trabajando siempre con sistemas reales.

Como se expuso en § 3.4, ambas instalaciones reproducen las condiciones termodinámicas de un motor de serie, facilitando la visualización del proceso

a través de un único y amplio acceso óptico. Si bien, en la figura se presenta el esquema para la visualización en la primera de las instalaciones, las variaciones con respecto al motor transparente radican únicamente en la presencia del espejo encargado de reflejar, hacia los sistemas de adquisición, la radiación transmitida a través de la ventana localizada en la cabeza del pistón.

En el esquema de la figura se puede observar como el equipamiento para la visualización del proceso de autoencendido y combustión lo conforman los sistemas de adquisición y de sincronización, sin que se requieran otro tipo de elementos adicionales como los de iluminación. Aunque en el esquema se representan ambos sistemas de adquisición (intensificado y no intensificado), las dimensiones de las cámaras y el acceso único de la instalación limitaron la visualización al uso de uno solo de ellos por serie de imágenes.

El registro de la radiación se llevó a cabo con dos diferentes sistemas de adquisición: la cámara ICCD DynaMight para la visualización de la quimioluminiscencia, y las cámaras CCD, PixelFly o Sensicam, para el registro de la radiación incandescente. Las características técnicas de las cámaras se pueden encontrar en la tabla 3.1. Estos sistemas cuentan con su propio equipo de control el cual se sincroniza con el evento de inyección por medio del sistema de sincronización presentado en § 3.3.3. Con el objetivo de lograr una sincronización temporal entre imágenes, la señal TTL de disparo del sistema intensificado se debe adelantar al de la cámara CCD pues existe una diferencia de respuesta de $100 \mu\text{s}$.

Puesto que la radiación incandescente emite en el rango visible electromagnético, es suficiente el uso de objetivos comerciales para el enfoque de las imágenes de incandescencia. En el caso de la visualización con cámara intensificada, se requiere un objetivo que además transmita en el espectro ultravioleta (UV). Concretamente, los estudios de este capítulo se realizaron con un objetivo comercial Nikon con focal de 60 mm para las imágenes de hollín, y un UV Bernhard Halle Nachfolger GmbH. con focal y apertura fijas de 100 mm y $f/2$, respectivamente. Para el filtrado de la radiación se utilizó un filtro interferencial de 310 nm con ancho de banda FWHM = 10 nm para la visualización de la quimioluminiscencia del OH, y un filtro de banda ancha de gran transmisividad en 430 nm para el CH.

Los tiempos de obturación empleados se configuraron alrededor de los $50 \mu\text{s}$ para todos los casos, variando ligeramente en ocasiones específicas según la experiencia. Este aspecto difiere de los tiempos empleados por autores como Higgins y Siebers [4], Ito *et al.* [20] y Musculus [21], para la realización de medidas de lift-off. Los autores emplearon tiempos del orden de la duración del evento de inyección. De esta manera consiguieron tener una imagen integral

de todo el proceso, sin considerar la variación temporal de la distancia entre el inyector y la zona de reacción. García [2] justifica la elección de tiempos cortos para poder seguir la evolución, no solo del lift-off, sino de todo el proceso de combustión. Adicionalmente, de esta manera se consigue realizar diferentes secuencias con diferentes configuraciones de ganancia del intensificador¹⁷, evitando así pérdidas por sensibilidad pobre o saturación en los sensores por exceso.

A modo de ejemplo, en la figura 6.3 se presentan, en la parte superior, dos diferentes imágenes del proceso de combustión de toberas multiorificio: de incandescencia y quimioluminiscencia. Estas imágenes contrastan con las inferiores correspondientes a otros tipos de configuraciones tanto de la visualización en la culata de múltiples accesos como por endoscopios. Entre las imágenes las diferencias más significativas se observan en la superposición de las zonas de reacción (ZOR) de los diferentes chorros y en la dificultad para establecer la pertenencia de una determinada ZOR a un chorro. La superposición no permite identificar una frontera clara entre chorros como si sucede con las imágenes de otras configuraciones o metodologías. No obstante, un análisis global de las intensidades de la radiación permite comparar en situaciones reales, sistemas de inyección, combustibles, etc.

6.2.3. Análisis de sensibilidad del método de visualización

Descripción temporal de sucesos

Como se mencionó previamente, en el diseño de la configuración para la visualización de toberas de múltiples orificios se ha tomado como base trabajos previos, más detallados, aplicados al estudio de toberas de orificio único. La fiabilidad de estos estudios se soporta por diversos trabajos de investigación y sus resultados se pueden encontrar en [2, 18, 19]. Para la descripción temporal de sucesos se han tomado como ejemplo las figuras 6.4 y 6.5, que son imágenes simultáneas de dos fenómenos visualizados: en primer lugar la fase líquida y la emisión de quimioluminiscencia de CH en la etapa de autoencendido, y en el segundo la radiación de incandescencia y la quimioluminiscencia del OH en la fase de difusión.

Tanto las imágenes de la radiación térmica como el del chorro líquido con la técnica de iluminación trasera difusa, han sido registradas con la cámara

¹⁷El nivel sensibilidad de un sistema intensificado depende del potencial eléctrico inducido entre el fotocátodo y el MCP del intensificador de la ICCD y es función de la ganancia, que en el caso de la ICCD DynaMight, se suele configurar como $G = 20$ mínimo y $G = 99$, valor máximo de ganancia para máxima sensibilidad (ver § 3.3.1).

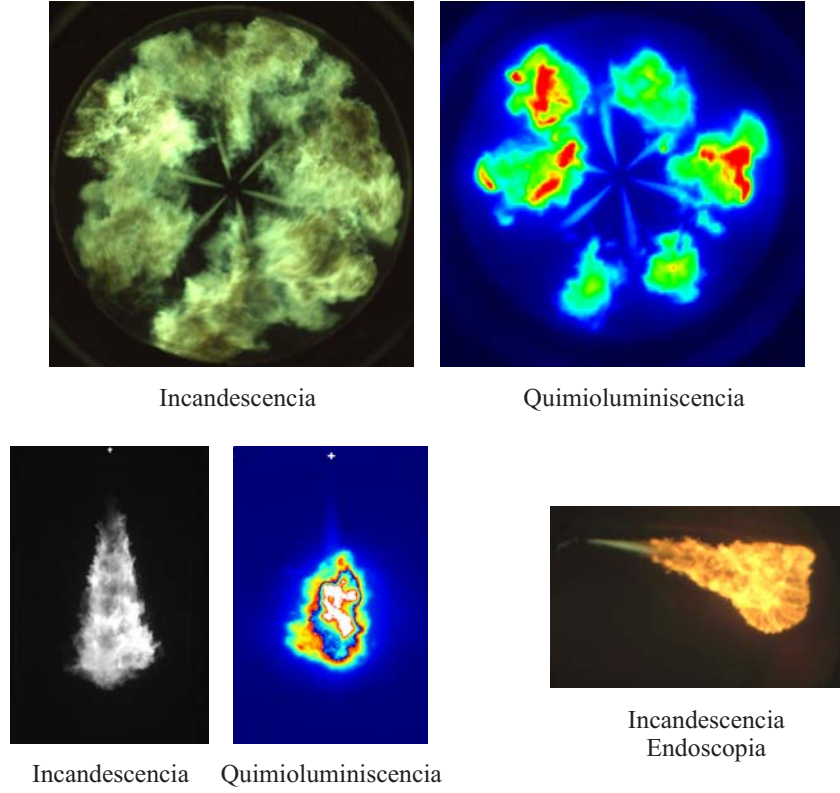


Figura 6.3: Ejemplo de imágenes de incandescencia y quimioluminiscencia de toberas de múltiples orificios y toberas de orificio único, y de incandescencia en motor con acceso por endoscopios.

CCD Sensicam (ver tabla 3.1). Los tiempos de obturación elegidos fueron de $25 \mu\text{s}$ para el registro de la radiación incandescente y $50 \mu\text{s}$ para el chorro líquido¹⁸. La luminiscencia se registró con la cámara ICCD DynaMight con tiempos de obturación de $50 \mu\text{s}$. Las imágenes corresponden a un punto en el que se inyecta con una presión $P_{inj} = 70 \text{ MPa}$ en una atmósfera de aire con presión y densidad en PMS $P_a = 7,5 \text{ MPa}$ y $\rho_a = 34 \text{ kg/m}^3$.

La representación de las imágenes comienza en un instante en el cual el chorro en fase líquida ha alcanzado su longitud líquida máxima ($\tau_{ASOE} = 980 \mu\text{s}$). La quimioluminiscencia de CH, se ha registrado configurando la ICCD con la máxima ganancia de modo que se pueda registrar la primera emisión de radiación de baja intensidad que se da a baja temperatura [10, 22]. Para el

¹⁸El tiempo real de exposición de la imagen es de $20 \mu\text{s}$ por las características propias de la fuente de luz estroboscópica (ver § 3.3.2).

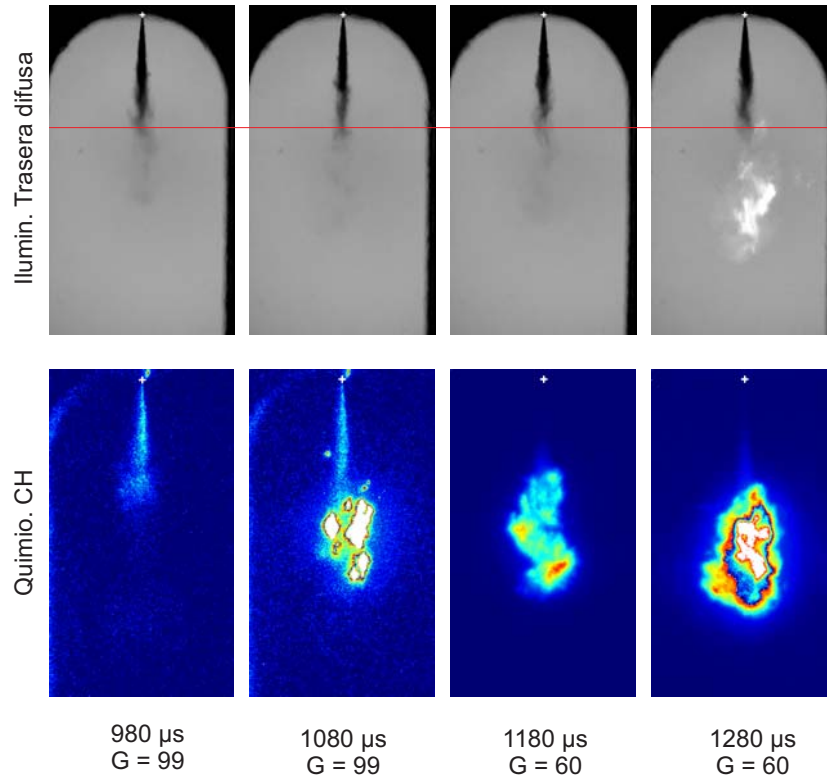


Figura 6.4: Ejemplo de imágenes simultáneas de chorro líquido, adquiridas con la técnica de iluminación trasera difusa, y quimioluminiscencia CH, con dos diferentes configuraciones de ganancia del intensificador de la ICCD.

tiempo de $1080 \mu\text{s}$, la temperatura y el nivel de radiación aumentan hasta la saturación de los sensores de la ICCD por lo que las imágenes siguientes se deben registrar con un nivel de ganancia inferior $G = 60$. En el último tiempo representado en la figura 6.4, se puede observar la presencia de radiación incandescente en las imágenes de iluminación trasera difusa, al superar, esta radiación, el umbral de detección del sistema de adquisición. En este punto, la radiación de incandescencia, de mayor intensidad, se superpone y enmascara la radiación de quimioluminiscencia de 432 nm , ya que esta longitud de onda se encuentra dentro del rango de emisión del hollín.

Tras la aparición de la fase de autoencendido a alta temperatura, el combustible se consume de manera muy rápida y comienzan a formarse tanto especies finales como precursoras del hollín. La pareja de imágenes correspondientes al tiempo de $1140 \mu\text{s}$ ASOE de la figura 6.5, muestran débiles trazas de radiación quimioluminiscente por la presencia de los radicales OH. No obstan-

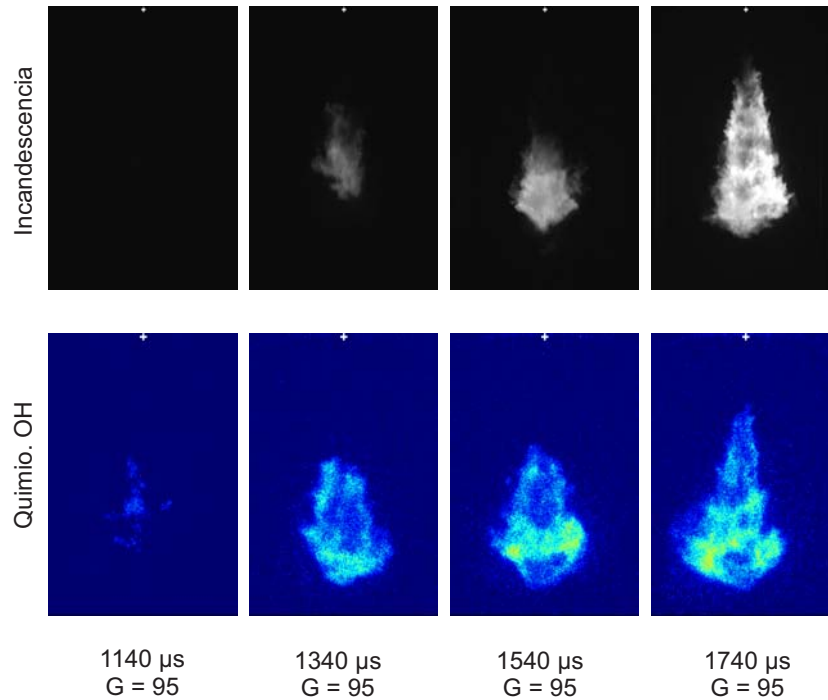


Figura 6.5: Ejemplos de imágenes simultáneas de amplio espectro, visualizadas con cámaras CCD, y de quimioluminiscencia de OH (radiación natural a 310 nm) con cámara intensificada.

te, no se observa radiación incandescente hasta un tiempo posterior cuando la temperatura es lo suficientemente alta como para que se pueda observar la incandescencia con la CCD. Una vez consolidada la llama, aunque es la radiación incandescente quien mayor intensidad presenta, se continúa con el registro de la quimioluminiscencia del OH por emitir ésta fuera del rango de emisión del hollín.

Sensibilidad según la configuración de los sistemas de adquisición

Con el análisis de las imágenes se consigue una información especialmente valiosa para la obtención de parámetros cuantificables que permitan obtener correlaciones experimentales o bien que puedan ser utilizados para ajuste y validación de modelos de chorro y combustión. Entre los parámetros espaciales más relevantes cabe destacar: la longitud líquida del chorro obtenida a partir de imágenes adquiridas con técnicas de dispersión, la longitud de lift-off a partir de las imágenes de OH, y la ubicación de las zonas de reacción tanto

de quimioluminiscencia, CH y OH, como de incandescencia, como se verá más adelante. Entre los parámetros temporales son especialmente importantes los tiempos de aparición del CH como trazador del proceso de autoencendido, del OH como trazador de la combustión a alta temperatura, o la propia aparición del hollín incandescente.

La precisión en la obtención de tales parámetros depende obviamente de la calidad de las imágenes ya que condiciona la calidad del procesado, pero también de la propia configuración experimental, en particular de la ganancia del intensificador de la ICCD. Un buen ejemplo se observa en las imágenes de CH con ganancias $G = 99$ y $G = 60$ de la figura 6.4. En el caso más sensible se observa un mayor nivel de ruido debido al mayor potencial eléctrico aplicado al acelerador de electrones del intensificador (MCP). Además, debido a la gran sensibilidad, los sensores registran débiles trazas de radiación dispersada por las gotas de combustible, provenientes del sistema de iluminación en la aplicación de la técnica de iluminación trasera difusa. Estas fuentes de ruido pueden influir en los resultados del análisis de las imágenes, aunque con una configuración menos sensible no sería posible el registro de la radiación más débil.

Junto a las diferencias en el nivel de ruido, se observan además diferencias en los niveles digitales de las imágenes: dependiendo del nivel de ganancia, el sistema intensificado adapta el rango dinámico de las imágenes al rango de intensidades registrables con cada configuración. Esto se ejemplifica en figura 6.6 donde se presentan dos parejas de imágenes referenciadas, por parejas, a un mismo tiempo ASOE. Las imágenes superiores con tiempos menores, han sido adquiridas con configuraciones de ganancia de $G99$ y $G60$, mientras en el caso más desarrollado, la diferencia de ganancias es solo de $G99$ y $G80$. De la misma forma en que se analizaban las imágenes de CH de la figuras 6.4, en las nuevas se observa un nivel de ruido mayor en los casos más sensibles. No obstante, en el caso de menor sensibilidad $G60$, parece observarse pérdidas de información que por el nivel de ganancia, no se registran. En la pareja inferior por el contrario, parece que la radiación se registra en los dos casos, aunque, la imagen de $G99$ parece tener niveles mayores, incluso llegando a la saturación.

Con la finalidad de poder hacer una comparación de las imágenes tomadas con distintas configuraciones de ganancia del intensificador en el estudio de sensibilidad realizado, se hace necesario normalizar la intensidad y buscar criterios claros que permitan obtener la información de las imágenes de la forma más objetiva posible y con mínimas incertidumbres. Así, por ejemplo, tras la normalización de la radiación de las parejas de imágenes de la figura 6.6, se esperaría que los niveles de intensidad corregidos tomaran valores similares

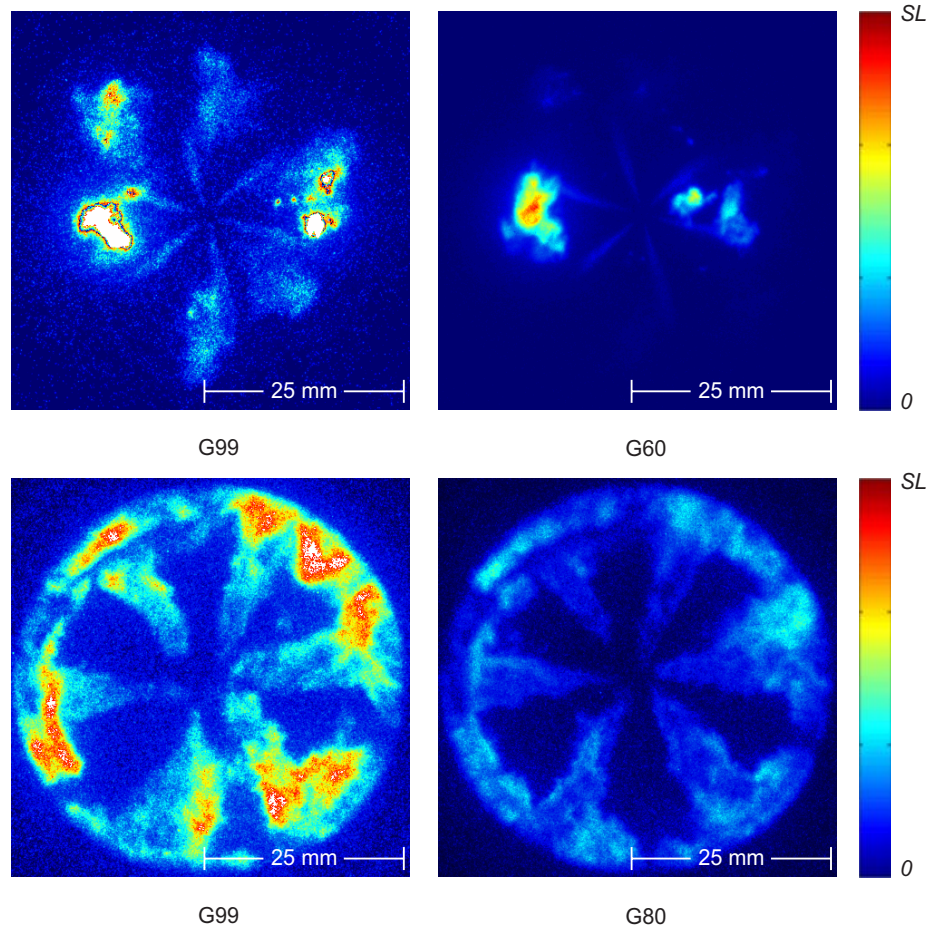


Figura 6.6: Pareja de imágenes de quimioluminiscencia correspondientes a diferentes configuraciones de ganancia del intensificador, para diferentes instantes del desarrollo del chorro.

salvo el nivel mínimo de fondo y la saturación observada en determinadas regiones las cuales solo son una medida errónea donde la intensidad supera el nivel digital mínimo y máximo del sistema de adquisición.

Para la normalización de las intensidades se toma el valor de nivel digital registrado y se corrige según la sensibilidad y el nivel de ruido térmico de fondo cual es el valor de nivel digital en ausencia de radiación (no se debe confundir con el ruido aleatorio inducido por el MCP). Este varía ligeramente según la configuración de ganancia alrededor de los 1030 niveles. El valor de la sensibilidad está dado por una función que depende del nivel de ganancia [23]. Si, la imagen es una matriz de puntos $M \times N$ con niveles digitales determinados

por la función $f(x, y)$ (ver ecuación 4.1), el valor de intensidad normalizado $I(x, y)$ se calcula según la relación 6.1.

$$I(x, y) = \frac{f(x, y) - 1030}{\text{sensitivity}(G)} \quad (6.1)$$

Este tipo de correcciones solo se aplican a secuencias de imágenes cuya única variante es la configuración de ganancias, como es el caso de las imágenes registradas con los sistemas intensificados. No aplica, por lo tanto, a casos en los cuales la óptica adhiere una variable adicional al sistema como en el caso de objetivos de apertura configurable.

Uno de los procesos más sensibles a la configuración de los equipos de adquisición utilizados en los estudios de la combustión, es el del autoencendido tanto por la pobre intensidad de la radiación emitida como por el orden de magnitud de los propios tiempos característicos del proceso. Un buen ejemplo se encuentra en el tiempo de retraso (τ_{delay}) el cual se define como el tiempo transcurrido desde el inicio del proceso de inyección (SOI) hasta el instante en el cual se presenta el inicio de las reacciones que dan lugar a la liberación de energía del combustible (SOC). No obstante, diversos autores han demostrado que el τ_{SOC} depende tanto el criterio que lo define como del método de registro para su estudio experimental [10, 24].

Con los métodos de visualización, la caracterización del autoencendido comienza con el instante en el cual se observa la primera emisión de radiación natural (SOL). El SOL marca el comienzo de una etapa de reacción de baja intensidad previa al inicio de la liberación de calor principal. Esta ha sido observada en paralelo con el aumento inicial de la señal de presión, que como se explicaba en § 2.4.2, proporciona información general de las características del proceso, mas no aporta información de la distribución de los fenómenos en el interior de la cámara. Higgins *et al.* [25], quienes realizan una comparativa de las medidas, muestran como el filtrado de la medida presión puede influir de manera decisiva en la determinación del instante preciso en el cual se presenta el SOC. Para el registro de la radiación, en la determinación del SOL, los autores han requerido sistemas de adquisición de gran sensibilidad como fotomultiplicadores o cámaras intensificadas.

Para ejemplificar la influencia de la sensibilidad de los instrumentos en a definición del SOL, en la figura 6.7, se presentan los resultados de un punto característico visualizando con la configuración para la visualización de toberas de múltiples orificios. El punto corresponde a la visualización de la radiación natural emitida en el proceso de autoencendido de los 6 chorros de una tobera real inyectando con $P_{inj} = 120$ MPa. La inyección se ha llevado a cabo

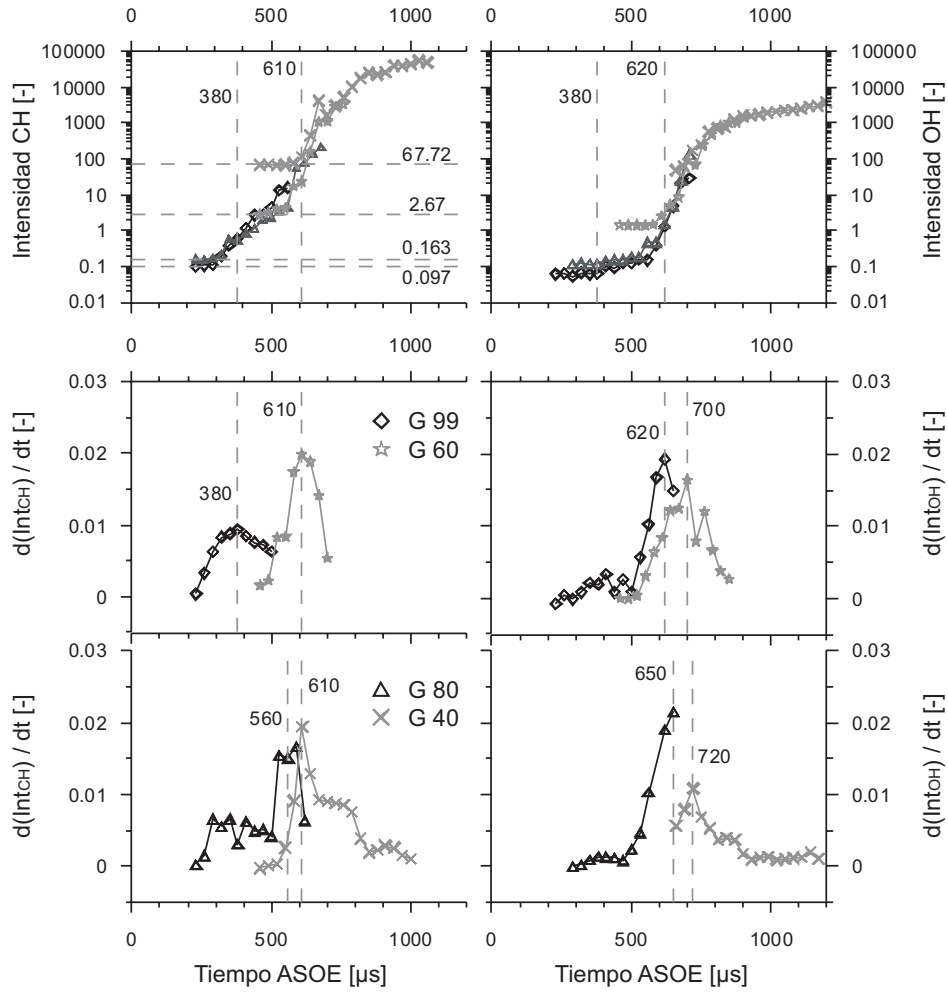


Figura 6.7: Gráficas de intensidad de radiación quimioluminiscente de CH y OH para cuatro configuraciones de ganancia del sistema de adquisición intensificado. Por comodidad las derivadas de las intensidades se presentan en dos gráficas separadas por parejas de ganancia.

en la instalación del motor maqueta operando a 500 rpm y con una inyección cada 30 ciclos de motor (con el objetivo de evitar transitorios térmicos durante el ensayo y minimizar el ensuciamiento de la ventana por deposición de productos). Las gráficas corresponden a las medidas de intensidad media normalizada para un punto de combustión desarrollado en un ambiente con presión y temperatura en PMS $P_a = 5.2$ MPa y $T_a = 900$ K.

La radiación se registró con la cámara ICCD DynaMight con 4 diferentes

configuraciones de ganancia, G99 máxima y G40 mínima. Se visualizó tanto la radiación de 432 nm (izquierda) como la de 310 nm (derecha), desde el instante en el que se envía la señal de apertura del inyector SOE hasta un tiempo posterior a la aparición de la radiación incandescente.

Las gráficas superiores de la figura corresponden a la superposición de los resultados de intensidad media calculada de las medidas en imágenes normalizadas adquiridas con los diferentes niveles de ganancia. Los resultados se presentan en escala logarítmica de modo que se pueda apreciar con mayor comodidad la radiación más débil. En las gráficas se observa la existencia de radiación correspondiente a la quimioluminiscencia del radical CH en los primeros instantes de tiempo; no obstante, solo a partir de 600 μ s aproximadamente, se empieza a observar la quimioluminiscencia de OH.

En ambas gráficas se observan los niveles de intensidad de radiación mínimos que son registrados en cada configuración de ganancia y según se usen filtros interferenciales para el estudio de las radiaciones de 310 o 432 nm. Como ejemplo, en la gráfica de intensidad de CH se han dibujado líneas horizontales con los valores mínimos registrados según la ganancia: es así como para G40 solo se registran intensidades por encima de los 67.72 niveles. No obstante, configuraciones más sensibles del intensificador consiguen registrar valores de radiación más débiles. Los valores máximos corresponden a niveles de intensidad previos a la saturación.

Buscando un criterio para la caracterización e identificación del SOL, en las gráficas inferiores de la figura 6.7, se han derivado temporalmente las intensidades donde se puede apreciar un pico característico correspondiente a un cambio brusco en la tendencia de la radiación registrada. Por comodidad, se han separado los resultados en dos gráficas cada una con dos configuraciones de ganancia. Obsérvese como entre los dos casos más sensibles en la visualización del CH (G99 y G80), la diferencia en el tiempo es de casi 200 μ s, mientras que en los casos menos sensibles es de solo 50 μ s. Esta diferencia es un indicador de una primera y más lenta etapa en la cual se inicia la emisión de radiación quimioluminiscente, pero cuya intensidad es tan débil que su detección depende mucho de la configuración experimental, pudiendo no ser detectada por sistemas o configuraciones menos sensibles. Aun así, se debe recordar que el radical CH es uno de los que mayor intensidad de radiación presenta en la etapa del autoencendido [6].

Las diferencias entre los valores obtenidos de las intensidades del CH contrastan con las del OH cuyo pico característico en la configuración más sensible G99, es posterior, aunque muy cercano al del CH con G40 (620 μ s y 610 μ s respectivamente). Igualmente se observa que mientras la diferencia entre va-

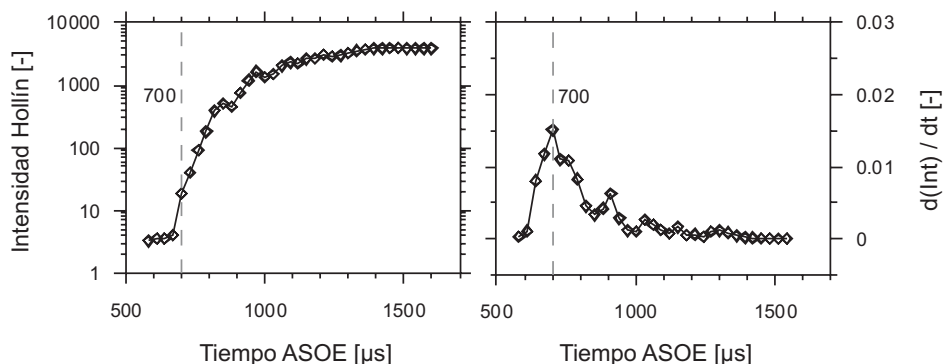


Figura 6.8: Gráficas de intensidad de la radiación incandescente y su derivada temporal.

lores extremos de las configuraciones G99 y G40, para CH, es de $230 \mu\text{s}$, en la visualización de OH es de apenas $100 \mu\text{s}$, lo que indica que tras el lento desarrollo de las primeras reacciones, una segunda etapa muestra menor dependencia temporal a la sensibilidad de los sistemas de adquisición debido a la rapidez con que se desarrolla. El registro y aumento rápido de la intensidad revelan no solo la presencia de las zonas de mezcla cercanas a la estequiométrica, sino también, un incremento muy rápido de la temperatura hasta los niveles requeridos para la incandescencia del hollín.

Manteniendo una analogía con las gráficas de CH y OH, en la figura 6.8 se presentan las medidas de intensidad de incandescencia y su derivada temporal. Los resultados corresponden a imágenes visualizadas con la cámara CCD PixelFly (ver tabla 3.1) provista con un objetivo comercial de 60 mm de focal. El tiempo de obturación de $50 \mu\text{s}$, permitió, con una configuración apropiada de apertura de diafragma ($f/4$), registrar las imágenes evitando la saturación de la CCD. Los resultados se grafican desplazados en el tiempo pero manteniendo el mismo intervalo de $1200 \mu\text{s}$ de las gráficas de quimioluminiscencia. No se aplicó la misma acción sobre la ordenada de la gráfica ya que de la medida de intensidades se compara la tendencia. No obstante, no es posible la normalización de las intensidades debido a las diferencias de respuesta espectral de los sensores y a las propiedades de la óptica utilizada (objetivos, filtros, etc.).

De acuerdo con la figura, la incandescencia comienza a registrarse alrededor de los $650 \mu\text{s}$ mostrando un fuerte incremento en $700 \mu\text{s}$. A partir de este instante, la señal de amplio espectro interfiere con la señal de quimioluminiscencia de CH, o dicho de otra forma, con la ICCD se registra solo la banda centrada en 432 nm correspondiente a la incandescencia del hollín. Se observa además un corto intervalo de tiempo desde el primer registro de la radiación

de OH con máxima ganancia del intensificador hasta la aparición de la incandescencia del hollín, lo que soporta la observación del rápido aumento de la temperatura.

Los tiempos característicos obtenidos del registro de la quimioluminiscencia del CH se comparan, en la figura 6.9, con las curvas de presión utilizadas habitualmente para determinar el SOC. En la figura se pueden apreciar las señales de presión medidas en el interior del motor tanto en los ciclos de arrastre (línea gris) como en los de combustión (línea negra). En la parte inferior se grafica, con línea continua negra, el comportamiento de la diferencia entre estas dos medidas ($\Delta P = P_{comb} - P_{arrastre}$) y, con línea discontinua, la segunda derivada de la presión del ciclo de combustión P_{comb} . Cabe resaltar que la presión en arrastre corresponde al valor medio de las presiones de 29 ciclos de motor y el de combustión a la medida realizada en el único ciclo en el que se inyecta.

En esta última gráfica se puede observar un breve período de tiempo característico en el cual la presión en arrastre es mayor que en combustión por lo que ΔP adquiere valores negativos. Este comportamiento pone de manifiesto el aporte energético del aire al proceso de evaporación del combustible que luego se recupera con el comienzo de la reacción exotérmica. De esta manera se observa el primer punto característico correspondiente al tiempo $433 \mu s$ ASOE, el cual identifica el instante en el que se inicia el aporte de calor de la combustión al aire almacenado en la cámara. Con la liberación de energía del combustible aumentan tanto la temperatura como la presión dentro de la cámara de combustión hasta igualarse con la medida de arrastre poco antes de los $610 \mu s$. Este es el segundo punto característico utilizado como referencia en la definición de τ_{SOC} [1, 26].

Los tiempos característicos determinados de las imágenes de quimioluminiscencia de CH adquiridos con máxima sensibilidad, quedan ubicados dentro del rango negativo de ΔP . No obstante, el tiempo menor se observa por debajo de mínimo de ΔP o primer punto característico de la curva de presión. Estas diferencias son atribuibles al tiempo de obturación de la ICCD de $50 \mu s$ lo que significa que una imagen referenciada a $380 \mu s$ ASOE, registra radiación hasta el tiempo de $430 \mu s$. También existe un rango de incertidumbre en la medida de presión por la precisión del instrumento de $33 \mu s$.

Los tiempos característicos observados de las medidas de OH quedan fuera del rango negativo pero dentro de un período en el cual se identifica un tercer punto referente de la curva de presión en combustión. Este punto se identifica en la gráfica por un marcado pico característico de la segunda derivada de la curva de presión en el tiempo $733 \mu s$. A partir de este instante se presenta una

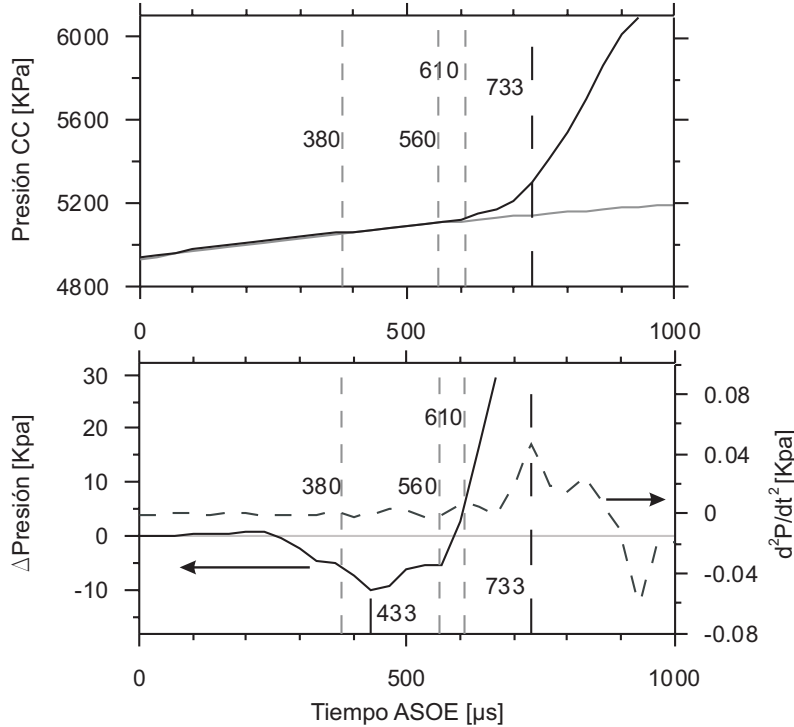


Figura 6.9: Comparación de los tiempos característicos según se visualice el CH o se registre la señal de presión. Gráfica superior: curvas de presión en cámara del ciclo de arrastre (gris) y de combustión (negro). En la gráfica inferior se superpone la diferencia entre la presión en combustión y arrastre (línea continua) a la segunda derivada de P_{comb} (línea discontinua).

aceleración en la reacción y por lo tanto un aumento en la presión dentro de la cámara de combustión. De acuerdo con Higgins *et al.* [25] este punto, que coincide con la aparición de la radiación incandescente, marca el final de la primera etapa del autoencendido (autoencendido a baja temperatura) y el inicio de la fase de combustión premezclada o segunda etapa del autoencendido.

6.3. Procesado de las imágenes

En cualquier aplicación de procesamiento digital de imágenes (PDI), la elección de los algoritmos adecuados para el análisis depende de dos factores: la calidad de las imágenes y la cantidad de información física relevante contenida en ellas.

La calidad de las imágenes, como se ha comentado anteriormente, se ve

fuertemente influenciada tanto por las características del equipamiento de adquisición (resolución espacial y temporal, y rango dinámico y espectral, por ejemplo) como por la configuración experimental (campo útil de visión, calidad de la iluminación, calidad de enfoque, existencia o no de distorsión, ruido en la imagen tanto por reflejos como por el grado de amplificación de los sistemas intensificados. . .). A este respecto, las imágenes de chorro líquido analizadas en el capítulo 4 podrían catalogarse como de buena calidad, así como las imágenes de iluminación trasera difusa. Por el contrario, las imágenes de quimioluminiscencia obtenidas con la ICCD con alta ganancia tienen una calidad mucho menor y las de Schlieren/shadowgraphy del capítulo 5 o las de endoscopía, podrían considerarse como de calidad intermedia. La validez de los algoritmos de segmentación basados en los métodos de umbralización como el LRT, dependerá en gran medida de la calidad y características de estas imágenes.

Respecto a la cantidad de información relevante que contienen, se ha discutido en los capítulos 4 y 5 que la única información extraíble de las imágenes era de tipo topológico, permitiendo detectar dónde había combustible y dónde no. En este sentido, los algoritmos propuestos, del tipo LRT, mostraron ser los más adecuados. En las imágenes de radiación natural de la combustión, tanto de quimioluminiscencia como de incandescencia, hay más información relevante, como por ejemplo, la definición de las zonas de aparición o existencia de determinadas especies (CH, OH y hollín) y el nivel de intensidad de la radiación con información sobre el proceso: en el caso de la quimioluminiscencia el nivel de intensidad de la imagen indica la intensidad de la reacción química, mientras que en caso de la incandescencia es un indicador tanto de la concentración de hollín como de la temperatura de llama.

Adicionalmente, en la visualización de toberas reales de múltiples orificios, cabe destacar que la aparición y desarrollo de las zonas de reacción pueden tener una ubicación espacial muy dispersa, generalmente con superposición entre las llamas de los diferentes chorros. En ese caso, la segmentación de las zonas de reacción procedentes de cada chorro es, sencillamente, imposible.

En base a estos argumentos, es fácil intuir que la detección de contornos puede ser inadecuada o, al menos, insuficiente para el tratamiento de las nuevas imágenes, siendo necesario el desarrollo de algoritmos radicalmente diferentes para el análisis de la información del autoencendido y combustión.

En el análisis de las imágenes de un solo chorro adquiridas en la instalación del motor maqueta (figuras 6.4 y 6.5), el criterio de selección del umbral con el LRT presentaba limitaciones asociadas a la baja calidad de la imagen registradas con cámara intensificada, redundando en una sobreestimación del contorno de la llama. De esta manera, García [2] utilizó un nuevo criterio,

basado en el cálculo del umbral mediante el análisis del desarrollo axial de la intensidad máxima, similar al utilizado por Higgins y Siebers [4] para la medida de la longitud de lift-off. Se obtenía el valor máximo de intensidad a diferentes distancias desde el inyector hasta el frente del chorro y se calculaba un umbral en función de la intensidad máxima y el nivel de fondo medio de la imagen.

Los algoritmos que se proponen a continuación se desarrollan para el caso de imágenes de combustión con toberas multiorificio. No obstante, son igualmente aplicables, con ligeras modificaciones que pueden intuirse fácilmente y en las que no se entrará en detalles, al análisis de imágenes de combustión de chorros aislados, tanto de incandescencia como de quimioluminiscencia.

En términos generales, debido a las características de las nuevas imágenes, los métodos de procesado propuestos se basan en el análisis estadístico de las distribuciones de intensidad observadas dentro de la cámara de combustión. Por el comportamiento variable de la ubicación de las zonas de reacción (ZOR), los parámetros característicos se miden sobre los perfiles de intensidad y no sobre contornos segmentados.

6.3.1. Algoritmos de procesado

Definición de sectores

El primer paso en el análisis de las imágenes consiste en la definición de sectores la cual se lleva a cabo con el objetivo de obtener información comparativa entre chorros. No obstante, esta información no es exacta por la superposición que se observa entre las ZOR, requiriéndose un análisis global adicional. Igual que en el procesado de las imágenes de chorro líquido y de Schlieren con toberas multiorificio, en las de combustión, se determina un número de sectores igual al número de chorros (n). Los sectores, cuyo ángulo es $360^\circ/n$, se diseñan tomando como origen la punta de la tobera (centro de la cámara de combustión) llegando hasta las paredes o los límites de accesibilidad óptica.

En la figura 6.10 se presenta un ejemplo de un sector de una imagen adquirida en una atmosfera con movimiento de aire lateral 'swirl'. En el caso del ejemplo, el swirl actúa en sentido horario por lo que el eje del chorro no se encuentra en la bisectriz del sector como ocurría con las imágenes de los capítulos previos. De esta forma se define un ángulo φ que como se aprecia en la figura, es la distancia entre el eje del chorro y el borde del sector. El valor de φ se elige en función del número de swirl que para el caso de la figura (único ejemplo con movimiento de aire) se estimó como el 80 % del ángulo del sector.

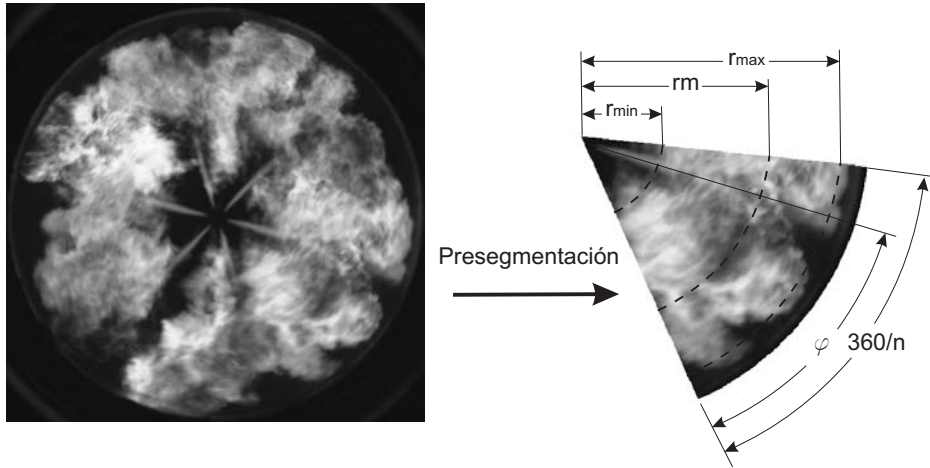


Figura 6.10: Definición de los sectores para el análisis estadístico de la intensidad de radiación de las imágenes de incandescencia y quimioluminiscencia de toberas de múltiples orificios. La posición del chorro φ varía según la cantidad o ausencia de 'swirl'.

En ausencia de swirl el valor de φ es del 50 % haciendo coincidir los ejes del chorro y sector.

Análisis de las distribuciones de intensidades

El análisis estadístico de las distribuciones de intensidades se llevó a cabo tanto en toda la cámara de combustión como en cada uno de los sectores de imagen. Este proceso consiste en el cálculo del área (A) igual a la suma de píxeles de la cámara o sector, y de la estimación de I_{cum} que es la suma de intensidades de los píxeles en A . Con estos valores se calcula la intensidad media según la relación:

$$I_{med} = \frac{I_{cum}}{A}$$

Otros datos aportados son el valor máximo de intensidad y su posición espacial.

Para el análisis se hace una conversión de la imagen a coordenadas polares (r, θ) con origen en la punta de la tobera de inyección. Cada sector de la imagen se divide en un número de 500 radios y 500 ángulos, suficientes para barrer apropiadamente la sección de imagen con un coste computacional aceptable. El barrido de cada sector se realiza, angularmente en sentido antihorario y

radialmente desde el inyector hasta las paredes de la cámara de combustión. Es así como se calculan para un determinado radio, la intensidad media, entre los 500 posibles valores según el ángulo, como:

$$I_{r_\theta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(r_\theta, \theta_i) \longrightarrow N = 500 \quad (6.2)$$

y para un determinado valor de ángulo, la intensidad media, entre los 500 posibles valores según el radio, como:

$$I_{\theta_r} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(r_i, \theta_r) \longrightarrow N = 500 \quad (6.3)$$

Con los valores de intensidad media se consigue construir los perfiles de distribución de intensidades como se presentan en la figura 6.11. Las dos gráficas corresponden a la distribución de dos sectores de imágenes diferentes. En la parte superior, la zona de reacción se encuentra distribuida en casi la totalidad del sector, mientras en el caso inferior esta zona se encuentra en las cercanías de las paredes de la cámara de combustión.

Con el fin de obtener información más refinada, los perfiles se normalizan para extraer de ellos valores de radio máximo (r_{max}), medio (r_{med}) y mínimo (r_{min}), permitiendo ubicar espacialmente las zonas de reacción ZOR. Buscando una analogía con las medidas de combustión de trabajos previos, los valores de r_{max} y r_{min} se comparan con la medida de penetración del chorro y la medida de lift-off. En el caso de r_{med} , éste es un indicador de donde se presenta la mayor intensidad de radiación.

Los valores característicos de la distribución de intensidades se estiman mediante la normalización de la distribución, modificándose la gráfica como se observa en la figura 6.12. La normalización se lleva a cabo mediante el reescalado de los valores de la abscisa de la distribución elevando el valor de radio a una potencia 'n' ($r \longrightarrow r^n$). Mediante un proceso de iteración, se evalúan diferentes valores de n calculando tanto la media μ de la distribución modificada y la desviación σ a derecha e izquierda de μ . Si el ajuste cumple con que la diferencia entre σ_{izq} y σ_{der} es igual o menor al 1%, r_{med}^n tomará el valor de μ y r_{max}^n y r_{min}^n los correspondientes a $\mu \pm 2\sigma$ respectivamente. Si no se encuentra un valor de n apropiado se repite el proceso y se evalúa la diferencia al 5%.

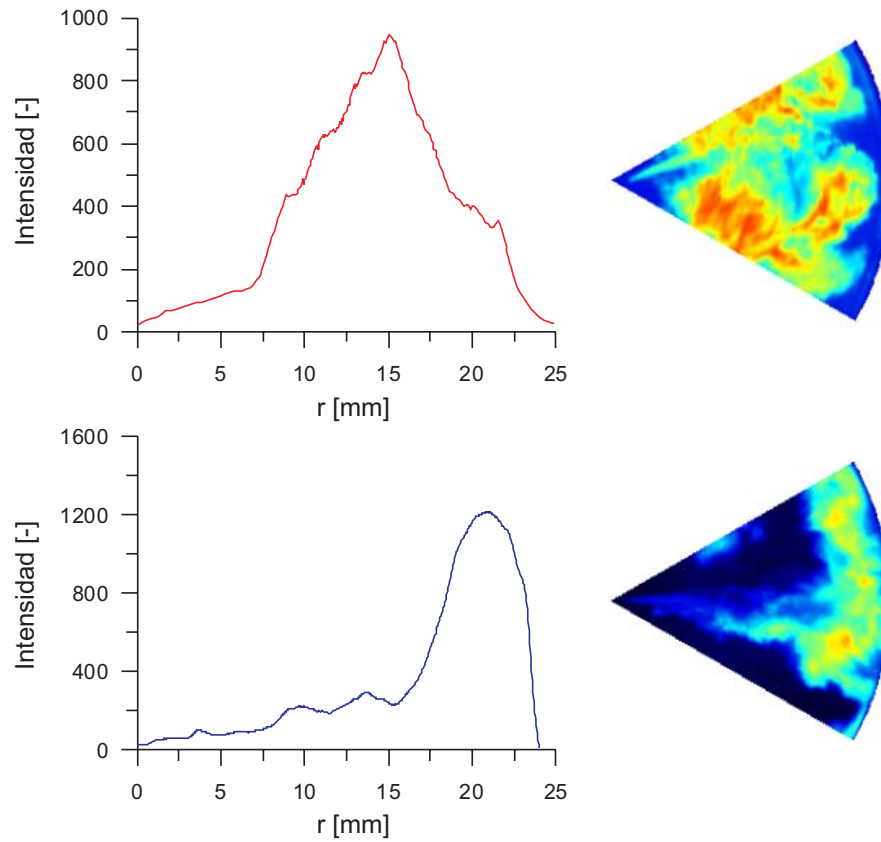


Figura 6.11: Perfil de la distribución de intensidad media radial del sector de dos diferentes tipos de imágenes: en presencia de movimiento de aire y gran dispersión de las ZOR (superior) y en ausencia de ‘swirl’ con ZOR en las cercanías de las paredes de la cámara (inferior).

Una vez calculados los parámetros de la distribución normalizada, los valores característicos se obtienen mediante la raíz enésima de los radios normalizados:

$$r_{min} = \sqrt[n]{\mu - 2\sigma}$$

$$r_{med} = \sqrt[n]{\mu}$$

$$r_{max} = \sqrt[n]{\mu + 2\sigma}$$

Como ejemplo de resultados en la figura 6.13 se puede apreciar la evolución

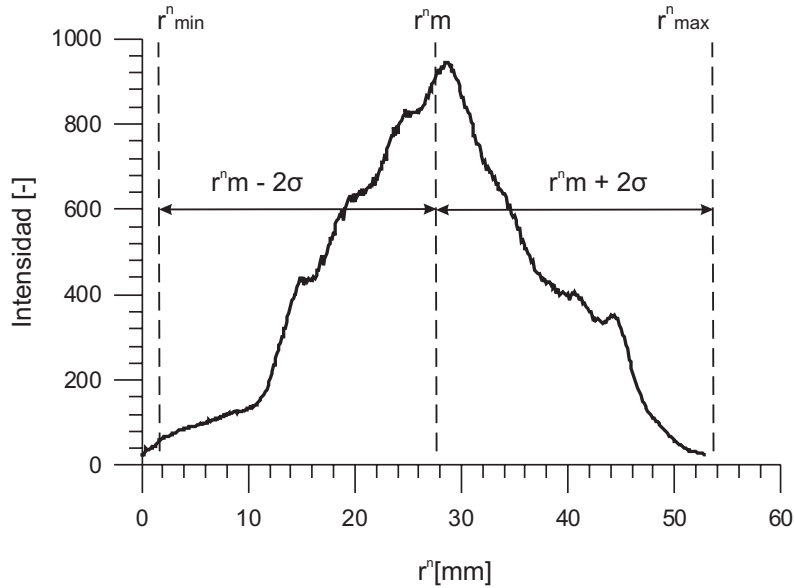


Figura 6.12: Perfil medio de la intensidad radial normalizada, mediante el reescalado de los radios elevando su valor a una potencia 'n'.

temporal de las medidas de radios característicos de imágenes, tanto de quimioluminiscencia de OH y CH como de incandescencia. Asimismo se incluye la medida de longitud líquida y se deriva el inicio de la inyección (SOI) mediante el ajuste lineal de los puntos correspondientes a los primeros instantes de la inyección. La secuencia corresponde a un punto con presión y temperatura en PMS $P_a = 5.2$ MPa y $T_a = 900$ K, inyectando con una tobera de 6 orificios a presión $P_{inj} = 80$ MPa.

En la curva de penetración, se observa como el chorro alcanza la longitud líquida máxima y se estabiliza hasta la aparición de la incandescencia. A partir de este momento el proceso de adquisición se detiene para cambiar la configuración de la CCD de visualización de líquido a visualización de incandescencia. Antes de la aparición de la incandescencia se observa la radiación de quimioluminiscencia del proceso de autoencendido del que se habló previamente. Tras el establecimiento de la reacción exotérmica autosustentada, tanto la señal de OH como de hollín se distribuye por toda la cámara de combustión. No obstante, la posición de intensidad máxima parece desplazarse hacia el inyector en los últimos instantes del proceso.

Con las medidas de longitudes características se tiene una información de la posición radial de las zonas de reacción. No obstante, esta medida no dice nada de la cantidad de radiación que se está midiendo ni de los instantes en los

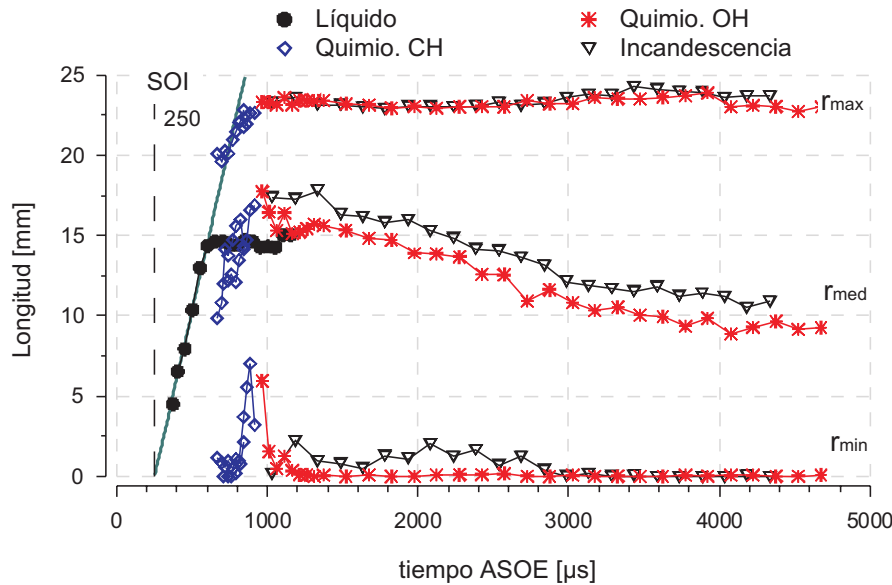


Figura 6.13: Curvas de penetración de chorro líquido y medidas de longitud características de la combustión quimioluminiscente e incandescente. Se estima el SOI mediante el ajuste lineal de los primeros puntos de penetración de líquido.

cuales se presenta mayor intensidad. Para complementarlos se puede recurrir a gráficas como las de la figura 6.14 en las cuales se observan no solo la posición radial de los eventos, sino también el nivel de intensidades en cada instante de tiempo.

Las gráficas del ejemplo contienen el valor medio de las intensidades de la radiación de una secuencia completa de imágenes. Como se puede apreciar en la figura, los resultados de la visualización de la quimioluminiscencia de CH y OH así como las de incandescencia del hollín, se presentan por separado. Sobre la gráfica de CH se superponen las medidas de penetración de chorro líquido y de chorro inerte evaporado. La visualización de la quimioluminiscencia termina en el instante en el cual se presenta la saturación del sensor de la ICCD. Las ganancias configuradas fueron G99 para la visualización de la quimioluminiscencia del CH y dos secuencias adicionales de OH con ganancias G99 y G95. En este ejemplo, la combustión se ha llevado a cabo en el interior de una cámara cilíndrica de 50 mm de diámetro, inyectando con una tobera de 6 orificios con $P_{inj} = 90 \text{ MPa}$ en atmósfera de aire con presión y temperatura en PMS $P_a = 7.0 \text{ MPa}$ y $T_a = 1000 \text{ K}$.

En las gráficas se observa la presencia de quimioluminiscencia de CH antes de la aparición del radical OH en la etapa de autoencendido de baja tempera-

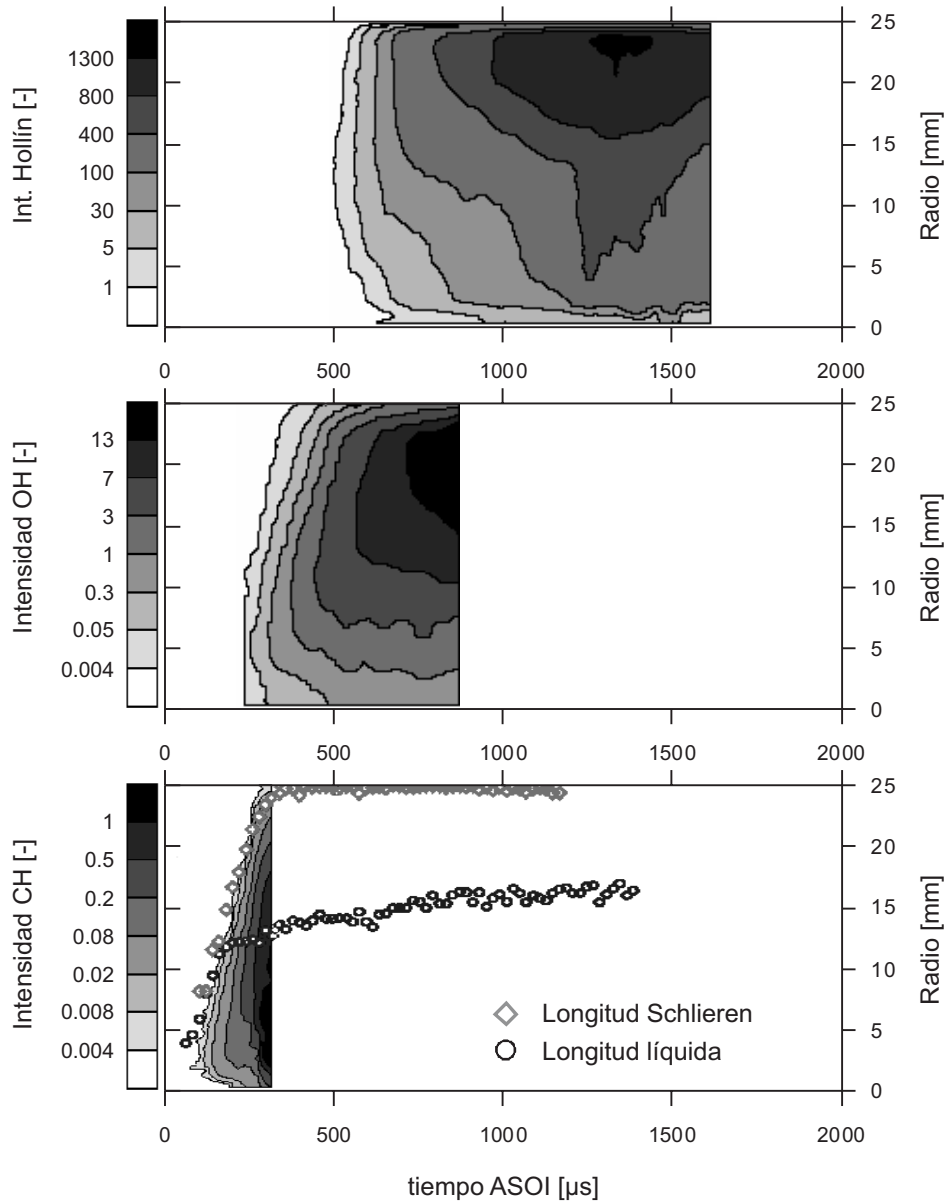


Figura 6.14: Descripción espacio-temporal de la evolución de la intensidad de radiación de quimioluminiscencia del CH y OH, y de la incandescencia del Hollín para unas condiciones de $P_{inj} = 90$ MPa, $P_a = 7.0$ MPa y $T_a = 1000$ K. La gráfica inferior, en la cual se superponen las medidas de líquido y vapor, corresponden a la etapa de autoencendido especialmente intenso en las cercanías de la tobera. En las dos superiores se observa el desarrollo de la fase de alta temperatura más intenso en los límites de la cámara de combustión.

tura. Conforme el chorro penetra en la cámara de combustión, la intensidad de este radical aumenta y sus límites siguen el frente del chorro donde el combustible se ha evaporado. Aunque por un breve instante de tiempo previo a la saturación, la radiación quimioluminiscente de CH parece ocupar toda la cámara de combustión, la gráfica señala la región cercana al inyector como la zona de mayor emisión. Por el contrario las reacciones de mayor temperatura de quimioluminiscencia de OH e incandescencia, presentan sus valores máximos en las cercanías de las paredes de la cámara de combustión.

6.4. Resumen y conclusiones

En el capítulo se ha propuesto una metodología para la visualización y caracterización de los procesos de autoencendido y combustión Diesel mediante el registro de la emisión de radiación natural de la quimioluminiscencia de los radicales CH y OH y la emisión de radiación térmica del hollín. Esta última, también conocida como de incandescencia, con niveles de intensidad muy superiores a los de la luminiscencia, se ha registrado con sistemas convencionales simples provistos de sensores CCD sensibles en el rango visible del espectro electromagnético. Por el contrario, para el registro de la radiación quimioluminiscente fue necesario el uso de sistemas intensificados, sensibles además en el espectro UV. Debido a los picos de emisión característicos de los radicales CH y OH, fue necesario anteponer al objetivo fotográfico, filtros interferenciales centrados en 432 y 310 nm, respectivamente.

El registro de la señal quimioluminiscente, ha sido especialmente importante para la caracterización, tanto espacial como temporal, del autoencendido espontáneo de la mezcla y de las regiones favorables a la formación de hollín. Con la descripción temporal de sucesos, se observó, mediante el registro del radical CH, un proceso a baja temperatura con una tasa de reacción igualmente baja en las regiones favorables a la formación de productos intermedios. El proceso se acelera y se empieza a observar la primera emisión de baja intensidad de OH para culminar con el establecimiento del proceso exotérmico. Espacialmente, esta información ha sido útil para la determinación de parámetros característicos como la penetración de las zonas reactivas y la longitud de lift-off observada de las imágenes de OH.

La precisión en la medida de los parámetros característicos ha mostrado gran dependencia especialmente a la configuración de la ganancia del intensificador de la ICCD: un nivel de ganancia muy alto, permite registrar la radiación más débil pero con un nivel de ruido alto; en contraposición, con una ganancia pobre no sería posible el registro de determinados niveles de intensidad. Con el

objetivo de minimizar el efecto del ruido y poder hacer una comparación de las imágenes tomadas con distintas configuraciones de ganancia, se normalizaron las imágenes mediante corrección del nivel digital registrado. En la corrección se tiene en cuenta el nivel de sensibilidad del instrumento de adquisición y el ruido térmico en ausencia de radiación.

Las imágenes fruto de la visualización, difieren entre sí según el número de chorros visualizados para cada configuración experimental. Del estudio de toberas de múltiples orificios, se resalta la superposición de las zonas de reacción de los diferentes chorros y la dispersión espacial entre las diferentes regiones. De esta manera se decidió el análisis estadístico de las distribuciones de intensidad, observadas tanto en la cámara de combustión como por sectores, y se midieron los parámetros característicos sobre los perfiles de intensidad y no sobre contornos segmentados. Concretamente la información aportada se basa en la medida y ubicación espacial de la región de mayor intensidad y el desarrollo medio, tanto angular como radial, de la quimioluminiscencia e incandescencia.

La filosofía de los algoritmos que aquí se presentan (basados en el estudio estadístico de la distribución de intensidades y en el posterior análisis temporal mediante la obtención de gráficas o mapas de distribución) ha sido la base para aplicaciones particulares de otros trabajos desarrollados por el grupo CMT [27–29]. Las pequeñas modificaciones, han obedecido a las características de los estudios específicos, los cuales se centran en la comparación de toberas, sistemas de inyección o de combustibles. Para ver diferencias (si son pequeñas) puede haber sido necesario refinar los parámetros de análisis de la distribución de intensidades.

El método se ha enfocado, especialmente, al caso de imágenes de combustión con toberas de múltiples orificios. No obstante, es igualmente aplicable, con ligeras modificaciones que pueden intuirse fácilmente, a la obtención y análisis de imágenes de combustión de chorros aislados.

Bibliografía

- [1] Zhao H. y Ladommatos N. *Engine combustion instrumentation and diagnostics*. Society of Automotive Engineers, ISBN 0-7680-0665-1, 2001.
- [2] García J.M. *Aportaciones al estudio del proceso de combustión turbulenta de chorros en motores diesel de inyección directa*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2004.
- [3] Payri F., Pastor J.V., García J.M. y Pastor J.M. “Contribution to the application of two-colour imaging to Diesel combustion”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 18, pp. 2579–2598, 2007.
- [4] Higgins B. y Siebers D. “Measurement of the flame lift-off location on DI diesel sprays using OH chemiluminescence”. *SAE paper 2001-01-0918*, 2001.
- [5] Dec J.E. y Coy E.B. “OH radical imaging in a DI diesel engine and the structure of the early diffusion flame”. *SAE paper 960831*, 1996.
- [6] Dec J.E. y Espey C. “Chemiluminescence imaging of autoignition in a DI diesel engine”. *SAE paper 982685*, 1998.
- [7] Bermúdez V., García J.M., Juliá E. y Martínez S. “Engine with optically accessible cylinder head: A research tool for injection and combustion processes”. *SAE paper 2003-01-1110*, 2003.
- [8] Siebers D.L., Higgins B. y Pickett L. “Flame lift-off on direct-injection diesel fuel jets: Oxygen concentration effects”. *SAE paper 2002-01-0890*, 2002.
- [9] Shoji H., Saima A. y Shiino K. “Simultaneous measurement of light emission and absorption behavior of unburned gas during knocking operation”. *SAE paper 932754*, 1993.
- [10] Dec J.E. y Espey C. “Ignition and early soot formation in a DI diesel engine using multiple 2-D imaging diagnostics”. *SAE paper 950456*, 1995.
- [11] Musculus M.P.B. “Multiple simultaneous optical diagnostic imaging of early-injection low-temperature combustion in a heavy-duty diesel engine”. *SAE paper 2006-01-0079*, 2006.

- [12] Payri F., Pastor J.V. y Arrègle J. “Endoscopic high speed visualization of injection and combustion processes in a DI diesel engine”. *Entropie*, Vol. 200, pp. 7–15, 1996.
- [13] Desantes J.M., Pastor J.V. y Molina S.A. “Analysis of the combustion process in a heavy-duty DI diesel engine through in-cylinder visualization”. *Proceedings of the ASME, Internal Combustion Engine Division*, Vol. 32, pp. 105–113, 1999.
- [14] Palomares A. *Análisis de imágenes de chorros diesel*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2001.
- [15] Desantes J.M., Pastor J.V., Arrègle J. y Molina S.A. “Analysis of the combustion process in a EURO III heavy-duty direct injection diesel engine”. *Journal of engineering for gas turbines and power*, Vol. 124, pp. 636–644, 2002.
- [16] González C.A. *Estudio de la influencia de la geometría de la tobera de inyección en la combustión y emisión de contaminantes de un motor diesel*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2005.
- [17] Benajes J., Molina S., González C. y Donde R. “The role of nozzle convergence in diesel combustion”. *Fuel*, Vol. 87, pp. 1849–1858, 2008.
- [18] Desantes J.M., Pastor J.V., García-Oliver J.M. y Pastor J.M. “A 1D model for the description of mixing-controlled reacting diesel sprays”. *Combustion and Flame*, Vol. 156, pp. 234–249, 2009.
- [19] Pastor J.V., García J.M., Pastor J.M. y Zapata L.D. “Visualization of the spatial and temporal evolution of a diesel flame”. *Fifth Symposium Towards Clean Diesel Engines. Lund, Sweden*, 2005.
- [20] Ito T., Kitamura T., Ueda M., Matsumoto T., Senda J. y Fujimoto H. “Effects of Flame Lift-Off and Flame Temperature on Soot Formation in Oxygenated Fuel Sprays”. *SAE paper 2003-01-0073*, 2003.
- [21] Musculus M.P. “Effects of the In-Cylinder Environment on Diffusion Flame Lift-Off in a DI Diesel Engine”. *SAE paper 2003-01-0074*, 2003.
- [22] Miles P.C., Choi D., Pickett L.M., Singh I.P. y und B.A. RempelEwert und H. Yun und R.D. Reitz N. Henein. “Rate-limiting processes in late-injection, low-temperature diesel combustion regimes”. *Conference on thermo- and Fluid dynamic processes in diesel engines (THIESEL)*, 2004.

- [23] LaVision. *DynaMight Camera System, operation manual*. LaVision, 1998.
- [24] Edwards C.F., Siebers D. y Hoskin D.H. “A study of the autoignition process of a diesel spray via high speed visualization”. *SAE paper 920108*, 1992.
- [25] Higgins B., Siebers D. y Aradi A. “Diesel-spray ignition and premixed-burn behavior”. *SAE paper 2000-01-0940*, 2000.
- [26] Heywood J.B. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill, Inc. ISBN 0-07-028637-X, 1988.
- [27] Pastor J.V., García-Oliver J.M., Pastor J.M. y Ramírez-Hernández J.G. “Experimental facility and methodology for systematic studies of cold startability in direct injection diesel engines”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, 2009.
- [28] Payri R., Salvador F.J., Gimeno J. y de la Morena J. “Effects of nozzle geometry on direct injection diesel engine combustion process”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 2051–2060, 2009.
- [29] Pastor J.V., Payri R., Gimeno J. y Nerva J.G. “Experimental study on RME blends: liquid-phase fuel penetration, chemiluminescence, and soot luminosity in diesel-like conditions”. *Energy and Fuels*, 2009 (Aceptado para su publicación).

Capítulo 7

Conclusiones y desarrollos futuros

Contenido

7.1. Conclusiones	263
7.2. Desarrollos futuros	271

7.1. Conclusiones

El objetivo general de la tesis doctoral es el desarrollo de metodologías de visualización completas (adquisición y procesado de imágenes) para la caracterización de los procesos de inyección, evaporación, autoencendido y combustión Diesel. El trabajo se ha enfocado fundamentalmente al caso de toberas reales de múltiples orificios; no obstante, partiendo, en ocasiones, de condiciones más simples en la visualización de chorros aislados. Para lograrlo, se han propuesto diferentes configuraciones experimentales y se han desarrollado los algoritmos para el procesado automático de las imágenes. Las metodologías, que aportan una valiosa información con amplia resolución espacial y temporal, se han convertido en herramientas de uso sistemático en las instalaciones ópticamente accesibles del grupo CMT (maquetas isoterma, motor maqueta y motor óptico transparente) debido a su relativa simplicidad y bajo coste.

Conservando la estructura temática del documento, se plantean las conclusiones particulares de las metodologías desarrolladas según se visualice el chorro líquido, el chorro evaporado o la radiación natural del proceso de combustión. En cada bloque se exponen las conclusiones más relevantes sobre la configuración optoelectrónica para la adquisición de las imágenes y las referentes al diseño y desarrollo de los algoritmos empleados en su análisis por ordenador.

Visualización del chorro líquido

Mediante la implementación de técnicas de dispersión elástica de radiación de amplio espectro, se registraron imágenes de chorro líquido de toberas multiorificio, iluminando con fuentes estroboscópicas de elevada intensidad, corta duración y control temporal preciso. Estas permitieron congelar el rápido evento en los 20 μs de duración del pulso a máxima intensidad. El proceso de inyección se llevó a cabo en la maqueta isoterma de nitrógeno, provista con tres accesos ópticos, y en las instalaciones con acceso único del motor maqueta y motor transparente. La cantidad de los accesos condicionó la puesta a punto del sistema de medida.

- Los tres accesos ópticos de la instalación isoterma fueron empleados, independientemente, para la visualización e iluminación. Aunque con esta estrategia, se evitan problemas de reflejos en las ventanas, se observó un cierto grado de variabilidad de las características de las imágenes según la posición relativa de los chorros respecto a la dirección de incidencia del haz radiante. Con esta observación, se definió una configuración

geométrica en la cual todos los chorros estuvieran bien iluminados, mediante el posicionamiento de las fibras de iluminación en una posición central a las ventanas.

- En las instalaciones con ambiente reactivo las dificultades de visualización fueron mayores: por un lado, tanto la visualización como la iluminación se llevaron a cabo por el mismo acceso óptico, lo que convirtió a las reflexiones generadas en las ventanas en un factor especialmente crítico, cuyo efecto se ha minimizado variando la orientación de las fibras de iluminación respecto al eje óptico de visualización; por otro lado, se requirió el uso de un obturador de cristal líquido (FLC) para evitar la exposición de radiación incandescente en el tiempo de descarga de los sensores CCD (el FLC ha afectado negativamente la calidad de las imágenes ya que su transmitancia es baja y en un rango espectral estrecho). Adicionalmente, se observó un deterioro más rápido de las propiedades ópticas de la ventana por deposición de combustible, aceite y productos de la combustión.

Con el procesado automático se ha conseguido extraer de las imágenes información más refinada. La secuencia completa del método de procesado se ha dividido en las fases de pre-procesado, segmentación y post-procesado:

- En la etapa de pre-procesado, se ha implementado un algoritmo de construcción de las matrices del espacio RGB, conservándose el amplio rango dinámico de las imágenes originales registradas con la cámara provista con arreglo de filtros de color (CFA). Con la implementación de este algoritmo se evitó el uso de funciones de filtrado espacial y se aumentó la población de histogramas disponibles para la estimación estadística (uno por cada matriz de color). Los histogramas se calcularon para cada sector de imagen independizando así el efecto de fluctuaciones de luz o heterogeneidades en el fondo.
- El proceso de segmentación se llevó a cabo con algoritmos del tipo 1D-LRT. Para la estimación estadística de los histogramas, se implementaron cuatro funciones de probabilidad, normal, log-normal, gamma y exponencial negativa, que modelaron los niveles digitales con mayor frecuencia que se asume pertenecen a la distribución de la clase fondo (radiación dispersada por productos remanentes, reflejos en la instalación, etc.). Por otro lado, la distribución de la clase chorro (radiación dispersada por las gotas de combustible), se modeló con la función gaussiana debido a la gran dispersión de sus niveles digitales.

- En la etapa de post-procesado se implementaron funciones tanto para la validación subjetiva de la bondad de la segmentación como para el cálculo de los parámetros geométricos característicos del chorro sobre los contornos segmentados, y se aplicaron nuevas funciones para el análisis de la variabilidad de los resultados entre chorros y entre diferentes inyecciones.

La robustez del algoritmo de segmentación ha sido evaluada también de manera objetiva mediante el procesado de diferentes imágenes características con diferentes condiciones de iluminación.

- En primer lugar se observó una mejora sustancial de los resultados comparados con los obtenidos con otros métodos de cálculo del umbral, que suelen requerir la interacción del usuario y que no consideran los posibles errores de estimación, o aplicando la segmentación con el LRT para funciones normalmente distribuidas. En este último caso, se observó la sobreestimación del contorno, especialmente crítico en las proximidades de la tobera, con diferencias de hasta 1 mm en la penetración y de más de cinco grados en el ángulo.
- Aunque la posición de las fibras de iluminación condicionaba la calidad visible de las imágenes, los resultados del análisis automático fueron bastante repetitivos salvo en los casos de pérdida de información por deficiencia excesiva o ausencia de iluminación en determinadas regiones del chorro.
- Las histogramas más difíciles de modelar fueron los correspondientes a imágenes con configuraciones de diafragma muy cerrados, traducido en formas casi asintóticas en el nivel digital cero y rango dinámico efectivo de las imágenes muy estrecho.
- Para todos los casos, la penetración mostró ser menos sensible a las variaciones en la configuración óptica. No obstante, las diferencias en ángulo han sido mucho más notorias especialmente en los primeros instantes de la inyección, donde las limitaciones de resolución espacial de la cámara se hacen más evidentes por el reducido tamaño del chorro.

Visualización del chorro evaporado

La visualización del proceso de evaporación se ha llevado a cabo mediante la implementación de las técnicas de Schlieren y Shadowgraph, las cuales interpretan los cambios de fase de la onda electromagnética al propagarse por

un medio ópticamente heterogéneo, convirtiéndolas en diferencias de intensidad fácilmente registrables por los sistemas de adquisición. Siendo una técnica novedosa en el grupo, ha sido necesario realizar un estudio completo de las posibilidades de implementación y de las variables que afectan la sensibilidad, y por lo tanto, a los resultados.

El diseño de la configuración estuvo condicionado por el número de accesos de las instalaciones, por lo que se definieron dos variantes particulares:

- Configuración por transmisión: para la visualización en instalaciones con múltiples accesos (maquetas isotermas y motor maqueta con la culata para el estudio de chorros aislado).
- Configuración de doble paso: para el estudio de toberas de múltiples orificios en la culata con acceso único.

Del proceso de adaptación y puesta a punto de los sistemas de medida (llevado a cabo fuera de la instalación para posteriormente ser ajustada a las condiciones de ensayo finales), y de las diferentes aplicaciones de las variantes, tanto de transmisión como de doble paso, se derivan las siguientes particularidades:

- Se ha observado la importancia de trabajar con sistemas de doble lente (L1 y L2), para el colimado y decolimado de la radiación (formación de la transformada), debido a la mayor flexibilidad en el aprovechamiento del espacio disponible en las instalaciones experimentales.
- Aunque ambas variantes comparten elementos comunes, en la de doble paso se ha requerido el uso de un espejo en el plano de culata y una lámina semitransparente. Debido a las adversas condiciones termodinámicas del motor, el espejo se fabricó en material metálico, realizando sobre él un proceso de pulido con acabado espejo. Evaluados diferentes materiales, se encontró un acero con alto contenido de cromo sobre el cual fue posible realizar el pulido con técnicas láser dando un acabado muy superior al de otros materiales. La radiación reflejada por el espejo, tras su paso por la cámara de combustión, se separa del haz incidente, mediante una lámina semitransparente 50/50 en soporte de vidrio. Otros sistemas evaluados, como las películas de nitrocelulosa, fueron descartados por su fragilidad y por las deformaciones por vibraciones asociadas al sistema de ventilación de la sala.

- Se ha propuesto una rutina completa para la optimización del proceso de alineación y enfoque del instrumento de medida: en el proceso de alineación destaca el uso del haz de un diodo láser, para la determinación del eje óptico del montaje, y de sistemas graduados de pantallas para la evaluación de la evolución del haz radiante; la rutina de enfoque se optimiza mediante el uso de un cilindro de cristal con el cual se evalúa, además del paralelismo del haz incidente y el grado de nitidez de la imagen del plano de los chorros, el grado de perpendicularidad de la radiación con el espejo de la variante de doble paso.
- En la maqueta isoterma de hexafluoruro de azufre, se han registrado, con la variante de transmisión, las ondas de presión de los frentes del chorro con un alto grado de sensibilidad, ausencia de ruido de fondo y alta resolución temporal con tiempos de exposición muy inferiores a los habituales. El análisis de la información, permitió detectar el comportamiento de las ondas de presión según el chorro superara o no la velocidad del sonido en el gas ambiente: en condiciones supersónicas, la velocidad del frente del chorro derivada de la penetración y la calculada midiendo el ángulo de las ondas de presión, dieron resultados muy similares; igualmente, en régimen subsónico, la velocidad del sonido se determinó como la velocidad a la cual se alejaban las ondas de presión, coincidiendo con el valor calculado para las condiciones termodinámicas del gas.
- En imágenes adquiridas en condiciones de motor con la misma variante de transmisión, se ha observado un nivel de ruido de fondo mucho mayor al caso anterior, causado esencialmente por la turbulencia del gas y la presencia de gradientes de presión y temperatura dentro de la cámara de combustión. Con el aumento de la sensibilidad del instrumento, mediante disminución del tamaño de la fuente radiante, el ruido se hace crítico afectando negativamente el contraste chorro-fondo, y con ello, los resultados del procesado automático de las imágenes. Por otro lado, diferentes niveles de filtrado en el plano de Fourier, sólo permitieron observar cambios en la intensidad del fondo sin modificaciones importantes en los niveles digitales del chorro. Para diferentes configuraciones de sensibilidad, tanto por el tamaño de la fuente como por la configuración del filtrado espacial, el chorro aparecía como una sombra, salvo por la presencia, en condiciones reactivas, de la radiación natural incandescente del proceso de combustión. De esta observación se deduce que los gradientes de índice de refracción son sensiblemente mayores en chorros evaporados que en el aire ambiente produciendo mayor refracción de la radiación la cual sale del sistema de lentes y no es registrada por los

fotorreceptores.

- En la variante de doble paso, el estudio de toberas reales sólo ha sido posible en condiciones inertes por la deposición de hollín; aún trabajando en condiciones inertes, un punto crítico de la medida fue la rápida degradación de las propiedades ópticas, tanto de la ventana como del espejo porta-inyector, debido a la deposición de combustible. Otro inconveniente encontrado fueron los reflejos en las propias caras de la ventana que reducían drásticamente la sensibilidad del instrumento y fueron eliminados de la imagen mediante filtrado espacial en el plano de Fourier. Mediante variaciones controladas del alineamiento del equipamiento óptico, y variando las propiedades termodinámicas del gas, se han observado diferencias importantes en las imágenes: en el caso de haz centrado, para cada uno de los puntos ensayados, el chorro aparece como una sombra sobre un fondo con niveles altos de intensidad y ruido; con el aumento del descentrado, empiezan a aparecer regiones iluminadas del chorro principalmente en la periferia y el frente, cuyas proporciones varían con la calidad de la evaporación. Esta observación ha confirmado la afirmación realizada para chorros aislados, de los altos niveles de refracción de la radiación.
- Aunque, en la configuración descentrada, la presencia de la región iluminada en el chorro podría ser útil como indicador a priori del grado de evaporación, éste no determina la frontera de separación entre las fases líquido y vapor. Las propias características de las imágenes, (que parecen muy intuitivas con una zona brillante donde parece que sólo existe vapor y una zona oscura donde parece razonable pensar que el chorro es líquido), puede dar lugar a errores serios de interpretación por un observador ajeno a las peculiaridades y fundamentos de la técnica.

El análisis de las imágenes se ha realizado de manera similar al caso de chorros líquidos salvo pequeñas modificaciones. Las conclusiones derivadas fueron:

- En la etapa de pre-procesado se ha observado la necesidad de la sustracción de una imagen media de fondos a la imagen de chorros.
- La segmentación se ha llevado a cabo con el algoritmo 1D-LRT para distribuciones normales de dos y tres clases a segmentar: en los casos de transmisión y centrado de doble paso, las clases fueron el chorro oscuro y el fondo; para el caso descentrado se contó además con las regiones iluminadas. La segmentación de tres clases se simplificó dividiendo el

problema en dos sistemas de selección de dos clases chorro iluminado-fondo, chorro oscuro-fondo.

- Para el caso descentrado, en la etapa de post-procesado, se han implementado algoritmos de integración de las regiones por la presencia de la zona de transición en el chorro con niveles digitales similares a los del fondo.
- Debido a que el procesado más cómodo y fiable se ha observado para las imágenes con chorro oscuro, y que las imágenes de descentrado no aportan información adicional relevante al análisis, la recomendación derivada de este trabajo para la realización de estudios sistemáticos es emplear la configuración centrada.

Visualización de la radiación natural de la combustión

La visualización de los procesos de autoencendido y combustión se ha llevado a cabo mediante el registro de la radiación natural de la quimioluminiscencia de los radicales CH y OH y de la radiación incandescente de hollín. Por la naturaleza de las técnicas, ha sido posible su implementación en el estudio de toberas reales tanto en la instalación de motor maqueta como en la del motor óptico transparente. El método es igualmente aplicable, con ligeras modificaciones que pueden intuirse fácilmente, a la obtención y análisis de imágenes de combustión de chorros aislados. Las principales observaciones derivadas de la puesta a punto de la configuración y del análisis de sensibilidad del método de visualización son las siguientes:

- La incandescencia se ha registrado con sistemas CCD convencionales sensibles en el espectro visible y en el infrarrojo cercano. Para la quimioluminiscencia, se han requerido sistemas intensificados, provistos, además, de una óptica sensible en el espectro ultravioleta, y de filtros interferenciales centrados en las longitudes de onda de máxima intensidad de los radicales OH y CH (310 y 432 nm, respectivamente).
- Mediante un análisis temporal de sucesos se observó, durante el autoencendido, un primer período de baja intensidad en las regiones favorables a la formación de productos intermedios como el radical CH. Unos microsegundos más tarde, se inicia un segundo período de reacción más rápida dominada por el OH, definiendo las regiones favorables a la formación del hollín. Con el aumento significativo de la temperatura, el hollín comienza a oxidarse, emitiendo radiación incandescente que se prolonga hasta el final de la fase de difusión.

- Con la adquisición y análisis de las imágenes, se han calculado los parámetros, tanto temporales como espaciales, que caracterizan las diferentes fases del proceso. La precisión de su medida, ha mostrado una especial dependencia a la configuración de la ganancia del intensificador de la ICCD, principalmente, en el período de autoencendido: un nivel de ganancia muy alto, permitió registrar la radiación más débil pero con un nivel de ruido alto; en contraposición, con una ganancia pobre, el nivel de radiación quedó por fuera del umbral de detección de los sensores. Con el objetivo de minimizar el efecto del ruido y poder hacer una comparación de las imágenes tomadas con distintas configuraciones de ganancia, se normalizaron las intensidades mediante corrección del nivel digital registrado. En la corrección se tiene en cuenta el nivel de sensibilidad del instrumento de adquisición y el ruido térmico en ausencia de radiación.

Mediante un análisis de sensibilidad, se registró la radiación de quimioluminiscencia del CH, con máxima ganancia del intensificador, 240 μ s antes de que se presentara la radiación de OH con la misma configuración. Tras el primer registro de radiación de OH, el proceso se acelera, registrándose la incandescencia del hollín unos 80 μ s más tarde. Este primer y más lento período de baja temperatura, destaca una mayor dependencia de la medida del CH a la configuración experimental, aunque los tiempos característicos varíen según las condiciones de contorno del experimento. Queda clara, la conveniencia de realizar estudios similares en el caso de nuevos sistemas de adquisición y en condiciones termodinámicas del proceso de combustión sensiblemente diferentes (mucho EGR o bajo contenido de oxígeno, combustibles diferentes, etc.).

- El análisis temporal de sucesos se ha comparado, con resultados satisfactorios, con la medida de presión instantánea utilizada por algunos investigadores para la caracterización temporal de la combustión. Se ha observado que la aparición de radiación quimioluminiscente tiene lugar antes de que se produzca el aumento de presión significativo en cámara de combustión.

Del procesado de las imágenes de combustión se concluye:

- Debido a las características de las imágenes de múltiples chorros (chorros superpuestos con gran dispersión espacial de las zonas de reacción) se ha concluido que la caracterización mediante obtención del contorno, es inadecuada e insuficiente.

- Se ha propuesto realizar un análisis estadístico de las distribuciones de intensidad, observadas tanto en la cámara de combustión como por sectores, midiendo los parámetros característicos espaciales sobre los perfiles de intensidad y no sobre contornos segmentados.
- Mediante la construcción de mapas de intensidad de las diferentes especies visualizadas, se consigue integrar toda la información de una secuencia completa, para la descripción temporal cómoda de sucesos.

7.2. Desarrollos futuros

La propuesta general de trabajos futuros está relacionada con el desarrollo tecnológico en el equipamiento optoelectrónico, especialmente los de adquisición de imágenes, que abren nuevas posibilidades de estudio y mejoras a las configuraciones ya existentes. Los desarrollos se enfocan principalmente a la mejora de las prestaciones como resolución espacial y temporal, sensibilidad y tiempo de respuesta. Actualmente el grupo CMT dispone de nuevos equipos de adquisición de alta velocidad, provistos con sensores CMOS, con los cuales se observa la posibilidad de visualizar un único evento de inyección, reduciéndose drásticamente los problemas de degradación de los elementos ópticos por deposición de combustible, aceite lubricante u hollín, en el caso reactivo. Otra ventaja importante sería la supresión del obturador de cristal líquido FLC para la visualización de chorro líquido en condiciones reactivas, ya que la velocidad de descarga de estos sistemas es mucho mayor al caso CCD, y el proceso de digitalización se realiza en el propio arreglo de sensores, evitándose la sensibilización en tiempo de descarga.

La implementación de estos sistemas podría significar cambios menores en las metodologías, con las mismas características de robustez, para el estudio de toberas de múltiples orificios: para la iluminación se requerirían fuentes continuas o pulsadas de gran frecuencia (la de adquisición); para el análisis de las imágenes se deben considerar además, el rango dinámico y el formato digital de los ficheros, de manera que puedan ser interpretados como una matriz de puntos con la información del nivel digital de cada píxel. Un punto importante en la adaptación de las metodologías estaría centrado en el análisis estadístico de los resultados, ya que se visualiza un único evento de inyección por repetición, sin que se presentase la variación entre imágenes de diferentes eventos como sucede en la visualización con sistemas CCD.

Particularmente, siendo que el trabajo propuesto para estudios de chorro líquido se ha enfocado a la visualización de todo el evento de inyección, la poca

resolución espacial de los chorros pequeños ha mostrado una gran dependencia tanto a la sensibilidad del sistema de adquisición como al procesado de las imágenes. Mayor precisión en la medida de estos chorros, podría lograrse con el aumento de la resolución espacial mediante el uso de una óptica adecuada de aumento o configuraciones especiales de lentes. Igualmente, se ha observado la necesidad de congelar el rápido evento de inyección, especialmente en los primeros instantes del proceso, debido al rápido avance del chorro. Con el alto nivel de sensibilidad alcanzado con las técnicas de Schlieren y Shadowgraph se podría lograr este último objetivo, ya que de otra manera, con tiempos de exposición menores, sería necesarias fuentes de iluminación de mayor intensidad y/o sistemas de adquisición de mayor precisión y sensibilidad.

En la aplicación de las técnicas de Schlieren y Shadowgraph convendría, además, explorar la posibilidad de trabajar con lentes o espejos esféricos de mayores dimensiones. De esta forma, menor radiación difractada saldría del sistema de lentes y podría ser manipulada en el plano de Fourier con máscaras más sofisticadas; asimismo, aumentaría la sensibilidad en el registro de la emisión natural de radiación incandescente que podría ser interesante con cámaras de color: una fuente externa de alta frecuencia (color azul) aumentaría el contraste entre la llama y los otros elementos de la imagen (en escala de grises solo se distinguen diferencias de intensidad que podrían ser similares para la llama y la radiación proveniente de la fuente externa). Con otras configuraciones de filtrado espacial, se podría eliminar el ruido de fondo de las imágenes, con lo que existiría la posibilidad de visualizar otros fenómenos como las ondas de presión no registradas en condiciones reactivas: se debe recordar que en la configuración de máximo descentrado de doble paso, las imágenes mostraron un nivel de ruido muy bajo, al salir éste del sistema de lentes utilizado. Con la implementación de lentes mayores, aumentarían las dimensiones del instrumento por lo que se requeriría mayor espacio en las instalaciones.

En estudios tradicionales de la evolución temporal de los procesos de auto-encendido y combustión, la forma habitual de la presentación de los resultados suele estar enfocada al análisis de la evolución radial del nivel de intensidad de las reacciones químicas. Este análisis es válido siempre que la dispersión entre chorros sea mínima. No obstante, en estudios con una problemática particular como la de arranque en frío con bujía, conviene identificar, adicionalmente, la posición angular de las zonas de reacción. Sectores más finos, buscando un compromiso entre el coste de procesado y la calidad de los resultados, facilitarían el logro de este objetivo mediante la obtención de mapas de ángulo polar vs. tiempo.

Por último, en la presente tesis, se ha registrado la radiación de baja in-

tensidad a 310 y 432 nm, atribuida a los radicales OH y CH respectivamente, y la radiación incandescente de amplio espectro por oxidación del hollín. Un análisis más fino, se conseguiría con la obtención de espectros de radiación en los diferentes instantes del proceso. De la espectrografía, se obtendrían además las longitudes de onda de mayor emisión en los diferentes instantes, pudiéndose definir la configuración óptica (filtros interferenciales), para la visualización espacial de otras especies.

Bibliografía

- [1] Ahmadi-Befrui B., Wiesler B. y Winklhofer E. “The propagation of fuel sprays in a research diesel engine – A join numerical and experimental analysis”. *SAE paper 910181*, 1991. **Aparece en: Cap.3**–[15].
- [2] Alcock J.F. y Scott W.M. “Some more light on Diesel Combustion”. *Proceedings, Institution of Mechanical Engineers, Automobile Division*, Vol. 5, pp. 179–191, 1962-1963. **Aparece en: Cap.3**–[61].
- [3] Alessandretti G.C. y Violino P. “Flame propagation monitoring in an engine by optical technique”. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 4, pp. 177–185, 1983. **Aparece en: Cap.3**–[34].
- [4] Armas O. *Diagnóstico experimental del proceso de combustión en motores Diesel de inyección directa*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1998. **Aparece en: Cap.2**–[1].
- [5] Arrègle J. *Análisis de la estructura y dinámica interna de chorros diesel*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1997. **Aparece en: Cap.2**–[16], **Cap.3**–[87], **Cap.5**–[31].
- [6] Arrègle J., Pastor J.V. y Ruiz S. “The influence of injection parameters on diesel spray characteristics”. *SAE paper 1999-01-0200*, 1999. **Aparece en: Cap.2**–[24], **Cap.3**–[13].
- [7] Bakenhus M. y Reitz R.D. “Two-color combustion visualization of single and split injections in a single-cylinder heavy-duty D.I. Diesel engine using an endoscope-based imaging system”. *SAE paper 1999-01-1112*, 1999. **Aparece en: Cap.3**–[46].

- [8] Baritaud T.A., Heinze T.A. y le Coz J.F. “Spray and self-ignition visualization in a D.I. diesel Engine”. *SAE paper 940681*, 1994. **Aparece en: Cap.2**–[41].
- [9] Benajes J., Molina S., González C. y Donde R. “The role of nozzle convergence in diesel combustion”. *Fuel*, Vol. 87, pp. 1849–1858, 2008. **Aparece en: Cap.6**–[17].
- [10] Benajes J., Payri R., Molina S. y Soare V. “Investigation of the influence of injection rate shaping on the spray characteristics in a diesel common rail system equipped with piston amplifier”. *ASME Journal of fluids engineering*, Vol. 127, pp. 1102–1111, 2005. **Aparece en: Cap.2**–[27].
- [11] Bermúdez V., García J.M., Juliá E. y 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.2**–[20], **Cap.6**–[7].
- [12] Bigas M., Cabruja E., Forest J. y Salvi J. “Review of CMOS image sensors”. *Microelectronics Journal*, Vol. 37, pp. 433–451, 2006. **Aparece en: Cap.3**–[72].
- [13] Black D.L., McQuay M.Q. y Bonin M.P. “Laser-based techniques for particle-size measurement: A review of sizing methods and their industrial applications”. *Progress in energy and combustion science*, Vol. 22, pp. 267–306, 1996. **Aparece en: Cap.3**–[7].
- [14] Born M. y Wolf E. *Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. Cambridge University Press, ISBN 0-521-64222-1, 1999. **Aparece en: Cap.3**–[1].
- [15] 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.2**–[21].
- [16] Bougie B., Tulej M., Dreier T., Dam N.J., Meulen J.J. Ter y Gerber T. “Optical diagnostics of diesel spray injections and combustion in a high-pressure high-temperature cell”. *Applied Physics B*, Vol. 80, pp. 1039–1045, 2005. **Aparece en: Cap.5**–[24].
- [17] Boyle W.S. y Smith G.E. “Charge coupled semiconductor devices”. *Bell System Technical Journal*, Vol. 49, pp. 587–593, 1970. **Aparece en: Cap.3**–[66].

- [18] Brugman M., Stoffels G.G.M., Dam N., Meerts W.L. y ter Meulen J.J. “Imaging and post-processing of laser-induced fluorescence from NO in a diesel Engine”. *Applied Physics B*, Vol. 64, pp. 717–724, 1997. **Aparece en: Cap.3**–[57].
- [19] Bruneaux G., Verhoevent D. y Baritaud T. “High pressure diesel spray and combustion visualization in a transparent model diesel engine”. *SAE paper 1999-01-3648*, 1999. **Aparece en: Cap.3**–[11].
- [20] Bysveen M., Almås T., Ulvund K.A., Jørgensen A. y Kvinge F. “Development of a shadowgraph image technique describing the fuel spray behavior in rapid compression Machine”. *SAE paper 2004-01-2934*, 2004. **Aparece en: Cap.3**–[106].
- [21] Carlson B.S. “Comparison of modern CCD and CMOS image sensor technologies and systems for low resolution imaging”. *Proceeding of IEEE*, Vol. 1, pp. 171–176, 2002. **Aparece en: Cap.3**–[71].
- [22] Cheng H.D., Jiang X.H., Sun Y. y Wang J. “Color image segmentation: advances and prospects”. *Pattern Recognition*, Vol. 34, pp. 2259–2281, 2001. **Aparece en: Cap.4**–[6].
- [23] Cho I.Y., Fujimoto H., Kuniyoshi H., Ha J.Y., Tanabe H. y Sato G.T. “Similarity law of entrainment into diesel spray and steady spray”. *SAE paper 900447*, 1990. **Aparece en: Cap.2**–[32].
- [24] Corcione F.E., Costa M., Vaglieco B.M. y de Maio A. “The role of radical species in diesel engine auto-ignition detection”. *SAE paper 2001-01-1003*, 2001. **Aparece en: Cap.2**–[49].
- [25] Correas D. *Estudio teórico-experimental del chorro libre diesel isoterma*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1998. **Aparece en: Cap.2**–[17].
- [26] Cossali G.E., Brunello G. y Coghe A. “LDV characterization of air entrainment in transient diesel sprays”. *SAE paper 910178*, 1991. **Aparece en: Cap.2**–[33].
- [27] Cronhjort A. y Wåhlin F. “Segmentation algorithm for diesel spray image analysis”. *Applied Optics*, Vol. 43, pp. 5971–5980, 2004. **Aparece en: Cap.3**–[107], **Cap.4**–[11].
- [28] Daily J.W. “Laser induced fluorescence spectroscopy in flames”. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 23, pp. 133–199, 1997. **Aparece en: Cap.3**–[55].

- [29] Dan T., Yamamoto T., Senda J. y Fujimoto H. “Effect of nozzle configuration for characteristics of non-reacting diesel fuel sprays”. *SAE paper 970355*, 1997. **Aparece en: Cap.2**–[29].
- [30] Dec J.E. “Soot distribution in a D.I. Diesel engine using 2-D Imaging of laser-induced incandescence, elastic scattering and flame luminosity”. *SAE paper 920115*, 1992. **Aparece en: Cap.3**–[43].
- [31] Dec J.E. “A conceptual model of DI diesel combustion based on laser-sheet imaging”. *SAE paper 970873*, 1997. **Aparece en: Cap.2**–[43], **Cap.3**–[38].
- [32] Dec J.E. y Canaan R.E. “PLIF imaging of NO formation in a DI diesel engine”. *SAE paper 980147*, 1998. **Aparece en: Cap.2**–[51], **Cap.3**–[56].
- [33] Dec J.E. y Coy E.B. “OH radical imaging in a DI diesel engine and the structure of the early diffusion flame”. *SAE paper 960831*, 1996. **Aparece en: Cap.2**–[46], **Cap.3**–[59], **Cap.6**–[5].
- [34] Dec J.E. y Espey C. “Ignition and early soot formation in a DI diesel engine using multiple 2-D imaging diagnostics”. *SAE paper 950456*, 1995. **Aparece en: Cap.2**–[45], **Cap.3**–[2], **Cap.6**–[10].
- [35] Dec J.E. y Espey C. “Chemiluminescence imaging of autoignition in a DI diesel engine”. *SAE paper 982685*, 1998. **Aparece en: Cap.2**–[44], **Cap.3**–[35], **Cap.6**–[6].
- [36] Dent J.C. “A basis for the comparison of various experimental methods for studying spray penetration”. *SAE paper 710571*, 1971. **Aparece en: Cap.2**–[25].
- [37] Desantes J.M., Arrègle J. y Pastor J.V. “Characterization of local fuel concentrations and internal dynamics in DI diesel sprays”. *SAE paper 970797*, 1997. **Aparece en: Cap.3**–[86].
- [38] Desantes J.M., Lapuerta M. y Salavert J.M. “Study on independent effects of diesel engine operating conditions on nitric oxide formation and emissions through schematical combustion simulation”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 210, pp. 71–80, 1996. **Aparece en: Cap.2**–[50].
- [39] Desantes J.M., Pastor J.M., Martínez S. y Riesco J.M. “Experimental characterization of the liquid phase penetration on evaporating diesel sprays”. *SAE paper 2005-01-2095*, 2005. **Aparece en: Cap.3**–[93].

- [40] Desantes J.M., Pastor J.V., Arrègle J. y Molina S.A. “Analysis of the combustion process in a EURO III heavy-duty direct injection diesel engine”. *Journal of engineering for gas turbines and power*, Vol. 124, pp. 636–644, 2002. **Aparece en: Cap.6**–[15].
- [41] Desantes J.M., Pastor J.V., García-Oliver J.M. y Pastor J.M. “A 1D model for the description of mixing-controlled reacting diesel sprays”. *Combustion and Flame*, Vol. 156, pp. 234–249, 2009. **Aparece en: Cap.5**–[38], **Cap.6**–[18].
- [42] Desantes J.M., Pastor J.V. y Molina S.A. “Analysis of the combustion process in a heavy-duty DI diesel engine through in-cylinder visualization”. *Proceedings of the ASME, Internal Combustion Engine Division*, Vol. 32, pp. 105–113, 1999. **Aparece en: Cap.6**–[13].
- [43] Desantes J.M., Payri R., Salvador F.J. y Gimeno J. “Measurements of spray momentum for the study of cavitation in diesel injection nozzles”. *SAE paper 2003-01-0703*, 2003. **Aparece en: Cap.2**–[22].
- [44] Desantes J.M., Payri R., Salvador F.J. y Soare V. “Study of the influence of geometrical and injection parameters on diesel sprays characteristics in isothermal conditions”. *SAE paper 2005-01-0913*, 2005. **Aparece en: Cap.3**–[90].
- [45] Dibble R.W. y Hollenbach R.E. “Laser Rayleigh thermometry in turbulent flames”. *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 18, pp. 1489–1499, 1981. **Aparece en: Cap.3**–[22].
- [46] Duda R.O., Hart P.E. y Stork D.G. *Pattern classification*. Wiley, 2nd ed., ISBN 0-471-05669-3, 2001. **Aparece en: Cap.3**–[101], **Cap.4**–[13].
- [47] Edwards C.F., Siebers D. y Hoskin D.H. “A study of the autoignition process of a diesel spray via high speed visualization”. *SAE paper 920108*, 1992. **Aparece en: Cap.2**–[48], **Cap.6**–[24].
- [48] Egmont-Petersen M., de Ridder D. y Handels H. “Image processing with neural networks—a review”. *Pattern Recognition*, Vol. 35, pp. 2279–2301, 2002. **Aparece en: Cap.3**–[98].
- [49] El-Beshbeeshy M.S., Hodges J.T. y Corradini M.L. “Image analysis of diesel sprays”. *SAE paper 921628*, 1992. **Aparece en: Cap.3**–[17].
- [50] Espey C. y Dec J.E. “Diesel engine combustion studies in a newly designed optical-access engine using high-speed visualization and 2-D laser imaging”. *SAE paper 930971*, 1993. **Aparece en: Cap.3**–[82].

- [51] Espey C. y Dec J.E. “The effect of TDC temperature and density on the liquid-phase fuel penetration in a D. I. Diesel engine”. *SAE paper 952456*, 1995. **Aparece en: Cap.3**–[12].
- [52] Espey C., Dec J.E., Litzinger T.A. y Santavicca D.A. “Planar laser Rayleigh scattering for quantitative vapor-fuel imaging in a Diesel Jet”. *Combustion and flame*, Vol. 109, pp. 65–86, 1997. **Aparece en: Cap.3**–[23].
- [53] Fettes C., Göttler A. y Leipertz A. “Simultaneous visualization of spray and flame propagation in a heavy-duty transparent-engine with common-rail injection system”. *SAE paper 2000-01-1797*, 2000. **Aparece en: Cap.3**–[42].
- [54] Fossum E.R. “CMOS image sensors: Electronic Camera-On-A-Chip”. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 44, pp. 1689–1698, 1997. **Aparece en: Cap.3**–[70].
- [55] Fujimoto H.G. “No flame region in diesel combustion in quiescent atmosphere”. *Conference on thermo- and Fluid dynamic processes in diesel engines (THIESEL)*, 2006. **Aparece en: Cap.3**–[79].
- [56] Fukunaga K. *Introduction to statistical pattern recognition*. Academic Press, 2nd ed., ISBN 0-12-269851-7, 1990. **Aparece en: Cap.3**–[102], **Cap.4**–[14].
- [57] Fuller R.P., Wu P.K. y Kirkendall K.A. “Effects of injection angle on atomization of liquid jets in transverse airflow”. *AIAA Journal*, Vol. 38, pp. 64–72, 2000. **Aparece en: Cap.5**–[20].
- [58] García J.M. *Aportaciones al estudio del proceso de combustión turbulenta de chorros en motores diesel de inyección directa*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2004. **Aparece en: Cap.1**–[3], **Cap.2**–[56], **Cap.5**–[41], **Cap.6**–[2].
- [59] Gimeno J. *Desarrollo y aplicación de la medida del flujo de cantidad de movimiento de un chorro Diesel*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2008. **Aparece en: Cap.2**–[9].
- [60] Glasbey C.A. “An analysis of histogram-based thresholding algorithms”. *Graphical Models and Image Processing*, Vol. 55, pp. 532–537, 1993. **Aparece en: Cap.3**–[100], **Cap.4**–[16].

- [61] Goldstein R.J. y Kuehn T.H. *Fluid mechanics measurement. Optical systems for flow measurement: shadowgraph, schlieren and interferometric techniques*. Taylor and Francis, 2nd ed., ISBN 1-56032-306-X, 1996. **Aparece en: Cap.5**–[1].
- [62] González C.A. *Estudio de la influencia de la geometría de la tobera de inyección en la combustión y emisión de contaminantes de un motor diesel*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2005. **Aparece en: Cap.2**–[11], **Cap.6**–[16].
- [63] González R.C. y Woods R.E. *Digital image processing*. Prentice Hall, 2nd ed., ISBN 0-201-18075-8, 2002. **Aparece en: Cap.3**–[95], **Cap.4**–[4], **Cap.5**–[43].
- [64] Gupta S., Poola R. y Sekar R. “Effect of injection parameters on diesel spray characteristics”. *SAE paper 2000-01-1600*, 2000. **Aparece en: Cap.3**–[77].
- [65] Hampson G.J. y Reitz R.D. “Two-color imaging of in-cylinder soot concentration and temperature in a heavy-duty DI diesel engine with comparison to multidimensional modeling for single and split injections”. *SAE paper 980524*, 1998. **Aparece en: Cap.3**–[47].
- [66] Hatori H., Narumiya K., Tsue M. y Kadota T. “Photographical analysis of initial breakup process of diesel spray”. *Conference on thermo- and Fluid dynamic processes in diesel engines (THIESEL)*, pp. 33–43, 2002. **Aparece en: Cap.2**–[15].
- [67] Hay N. y Jones P.L. “Comparison of the various correlations for spray penetration”. *SAE paper 720776*, 1972. **Aparece en: Cap.2**–[26].
- [68] Heywood J.B. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill, Inc. ISBN 0-07-028637-X, 1988. **Aparece en: Cap.2**–[13], **Cap.3**–[14], **Cap.6**–[26].
- [69] Higgins B. y 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.2**–[55], **Cap.3**–[39], **Cap.6**–[4].
- [70] Higgins B., Siebers D. y Aradi A. “Diesel-spray ignition and premixed-burn behavior”. *SAE paper 2000-01-0940*, 2000. **Aparece en: Cap.2**–[42], **Cap.3**–[40], **Cap.6**–[25].

- [71] Hijazi A. y Madhavan V. “A novel ultra-high speed camera for digital image processing applications”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 19, 2008. **Aparece en: Cap.3**–[68].
- [72] Hillebrand M., Stevanovic N., Hosticka B.J., Santos-Conde J.E., Teuner A. y Schwarz M. “High speed camera system using a CMOS image sensor”. *Proceeding of IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 656–661, 2000. **Aparece en: Cap.3**–[69].
- [73] Hiroyasu H. y Arai M. “Structures of fuel spray in diesel engines”. *SAE paper 900475*, 1990. **Aparece en: Cap.2**–[12], **Cap.4**–[20], **Cap.5**–[28].
- [74] Hiroyasu H. y Kadota T. “Fuel droplet size distribution in diesel combustion chamber”. *SAE paper 740715*, 1974. **Aparece en: Cap.2**–[37].
- [75] Holman J.P. *Experimental methods for engineers*. McGraw-Hill, Inc., 7nd ed., ISBN 0-07-366055-8, 2001. **Aparece en: Cap.5**–[8].
- [76] Ikeda Y., Yamada N. y Nakajima T. “Multi-intensity-layer particle-image velocimetry for spray measurement”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 11, pp. 617–626, 2000. **Aparece en: Cap.3**–[21].
- [77] Imaging PCO. *PixelFly, operation instructions*. PCO. Imaging, 2002. **Aparece en: Cap.4**–[8].
- [78] Ito T., Kitamura T., Ueda M., Matsumoto T., Senda J. y Fujimoto H. “Effects of Flame Lift-Off and Flame Temperature on Soot Formation in Oxygenated Fuel Sprays”. *SAE paper 2003-01-0073*, 2003. **Aparece en: Cap.6**–[20].
- [79] Juliá J.E. *Medida de concentraciones de combustible en chorros diesel mediante técnicas de fluorescencia inducida por láser*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003. **Aparece en: Cap.1**–[2], **Cap.3**–[4], **Cap.5**–[32].
- [80] Karpen V., Thomsen L. y Suess E. “A new ‘schlieren’ technique application for fluid flow visualization at cold seep sites”. *Marine Geology*, Vol. 204, pp. 145–159, 2004. **Aparece en: Cap.5**–[11].
- [81] Klein-Douwel R.J.H., Frijters P.J.M., Somers L.M.T., Boer W.A. y Baert R.S.G. “Macroscopic diesel fuel spray shadowgraphy using high speed digital imaging in a high pressure cell”. *Fuel*, Vol. 86, pp. 1994–2007, 2007. **Aparece en: Cap.3**–[105].

- [82] Kleine H., Grönig H. y Takayama K. “Simultaneous shadow, schlieren and interferometric visualization of compressible flows”. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 44, pp. 170–189, 2006. **Aparece en: Cap.5–[14].**
- [83] Kock B.F., Tribalet B., Schulz C. y Roth P. “Two-color time-resolved LII applied to soot particle sizing in the cylinder of a Diesel engine”. *Combustion and Flame*, Vol. 147, pp. 79–92, 2006. **Aparece en: Cap.3–[53].**
- [84] Kogelschatz U. y Schneider W.R. “Quantitative schlieren techniques applied to high current arc investigations”. *Applied Optics*, Vol. 11, pp. 1822–1832, 1972. **Aparece en: Cap.5–[7].**
- [85] Kohse-Höinghaus K. “Laser techniques for the quantitative detection of reactive intermediates in combustion systems”. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 20, pp. 203–279, 1994. **Aparece en: Cap.3–[60].**
- [86] Koo J.Y. y Martin J.K. “Droplet sizes and velocities in a transient diesel fuel spray”. *SAE paper 900397*, 1990. **Aparece en: Cap.2–[38].**
- [87] Kuniyoshi H., Tanabe H., Sato G.T. y Fujimoto H. “Investigation on the characteristics of diesel fuel spray”. *SAE paper 800968*, 1980. **Aparece en: Cap.2–[31].**
- [88] Kunkulagunta K.R. “Video imaging and analysis of common rail sprays in an optical engine using shadowgraphy technique”. *SAE paper 2000-01-1255*, 2000. **Aparece en: Cap.3–[30], Cap.5–[10].**
- [89] Lapuerta M. *Un modelo de combustión fenomenológico para un motor Diesel de inyección directa rápido*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1988. **Aparece en: Cap.2–[4].**
- [90] Lapuerta M., Armas O. y Gomez A. “Diesel particle size distribution estimation from digital image analysis”. *Aerosol Science and Technology*, Vol. 37, pp. 369–381, 2003. **Aparece en: Cap.3–[97].**
- [91] Lapuerta M., Armas O. y Hernández J.J. “Diagnosis of DI Diesel combustion from in-cylinder pressure signal by estimation of mean thermodynamic properties of the gas”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 19, pp. 513–529, 1999. **Aparece en: Cap.2–[3].**

- [92] Lapuerta M., Hernandez J.J. y Gimenez F. “Evaluation of exhaust gas recirculation as a technique for reducing diesel engine NO_x emissions”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Vol. 214, pp. 85–93, 2000. **Aparece en: Cap.2**–[52].
- [93] Lapuerta M., Martos F. y Herreros J.M. “Effect of engine operating conditions on the size of primary particles composing diesel soot agglomerates”. *Journal of Aerosol Science*, Vol. 38, pp. 455–466, 2007. **Aparece en: Cap.2**–[57].
- [94] Larsson A. “Optical studies in a DI diesel engine”. *SAE paper 1999-01-3650*, 1999. **Aparece en: Cap.2**–[54].
- [95] LaVision. *DynaMight Camera System, operation manual*. LaVision, 1998. **Aparece en: Cap.3**–[73], **Cap.6**–[23].
- [96] Lee C.S. y Reitz R.D. “Effect of liquid properties on the breakup mechanism of high-speed liquid drops”. *Atomization and Sprays*, Vol. 11, pp. 1–19, 2001. **Aparece en: Cap.2**–[14].
- [97] Lee S., Kusaka J. y Daisho Y. “Spray characteristics of alternative fuels in constant volume chamber (comparison of the spray characteristics of LPG, DME and *n*-dodecane)”. *JSAE Review*, Vol. 22, pp. 271–276, 2001. **Aparece en: Cap.3**–[10].
- [98] Lefebvre A.H. *Atomization and sprays*. Hemisphere Publishing Corporation, ISBN 0-89116-603-3, 1989. **Aparece en: Cap.2**–[36].
- [99] López J.J. *Estudio teórico-experimental del chorro libre diesel no evaporativo y de su interacción con el movimiento de aire*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003. **Aparece en: Cap.2**–[35], **Cap.4**–[22].
- [100] Lukac R., Plataniotis K.N. y Hatzinakos D. “Color image zooming on the bayer pattern”. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 15, pp. 1475–1492, 2005. **Aparece en: Cap.3**–[76], **Cap.4**–[7].
- [101] Lukin A. y Kubasov D. “High-Quality algorithm for bayer pattern interpolation”. *Programming and Computer Software*, Vol. 30, pp. 347–358, 2004. **Aparece en: Cap.3**–[75].

- [102] MacPhee A.G., Tate M.W., Powell C.F., Yue Y., Renzi M.J., Ercan A., Narayanan S., Fontes E., Walther J., Schaller J., Gruner S.M. y Wang J. “X-ray imaging of shock waves generated by high-pressure fuel sprays”. *Science*, Vol. 295, pp. 1261–1263, 2002. **Aparece en: Cap.5**–[13].
- [103] Martínez S. *Desarrollo de una instalación experimental para el estudio de chorros diesel evaporados en atmósfera inerte y reactiva*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003. **Aparece en: Cap.3**–[91], **Cap.5**–[40].
- [104] Maunoury B., Duverger T. y Mokaddem K. “Phenomenological analysis of injection, auto-ignition and combustion in a small D. I. Diesel engine”. *SAE paper 2002-01-1161*, 2002. **Aparece en: Cap.3**–[25].
- [105] Melling A. “Tracer particles and seeding for particle image velocimetry”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 8, pp. 1406–1416, 1997. **Aparece en: Cap.3**–[19].
- [106] Merzkirch W. *Flow visualization*. Academic Press, 2nd ed., ISBN 0-12-491351-2, 1987. **Aparece en: Cap.5**–[5].
- [107] Michelsen H.A., Liu F., Kock B.F., Bladh H., Boiarciuc A., Charwath M., Dreier T., Hadeff R., Hofmann M., Reimann J., Will S., Bengtsson P.E., Bockhorn H., Foucher F., Geigle K.P., Mounaïm-Rousselle C., Schulz C., Stirn R., Tribalet B. y Suntz S. “Modeling laser-induced incandescence of soot: a summary and comparison of LII models”. *Applied Physics B*, Vol. 87, pp. 503–521, 2007. **Aparece en: Cap.3**–[54].
- [108] Miles P.C., Choi D., Pickett L.M., Singh I.P. y und B.A. RempelEwert und H. Yun und R.D. Reitz N. Henein. “Rate-limiting processes in late-injection, low-temperature diesel combustion regimes”. *Conference on thermo- and Fluid dynamic processes in diesel engines (THIESEL)*, 2004. **Aparece en: Cap.6**–[22].
- [109] Milton B.E. y Pianthong K. “Pulsed, supersonic fuel jets—A review of their characteristics and potential for fuel injection”. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 26, pp. 656–671, 2005. **Aparece en: Cap.5**–[30].
- [110] Moore D.T. “Gradient-index optics: a review”. *Applied Optics*, Vol. 19, pp. 1035–1038, 1980. **Aparece en: Cap.5**–[6].
- [111] Mullikin J.C., Vliet L.J., Netten H., Boddeke F.R., van der Feltz G. y Young I.T. “Methods for CCD camera characterization”. *Proceeding of SPIE*, Vol. 2173, pp. 73–84, 1994. **Aparece en: Cap.3**–[67].

- [112] Musculus M.P. “Effects of the In-Cylinder Environment on Diffusion Flame Lift-Off in a DI Diesel Engine”. *SAE paper 2003-01-0074*, 2003. **Aparece en: Cap.6**–[21].
- [113] Musculus M.P.B. “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.3**–[37], **Cap.6**–[11].
- [114] Myong K., Arai M., Suzuki H., Senda J. y Fujimoto H. “Vaporization characteristics and liquid-phase penetration for multi-component fuels”. *SAE paper 2004-01-0529*, 2004. **Aparece en: Cap.5**–[23].
- [115] Naber J.D. y Siebers D.L. “Effects of gas density and vaporization on penetration and dispersion of diesel sprays”. *SAE paper 960034*, 1996. **Aparece en: Cap.2**–[23], **Cap.4**–[21], **Cap.5**–[9].
- [116] Nakahira T., Komori M., Nishida M. y Tsujimura K. “The shock wave generation around the diesel fuel spray with high pressure injection”. *SAE paper 920460*, 1992. **Aparece en: Cap.5**–[29].
- [117] Ni T., Pinson J.A., Gupta S. y Santoro R.J. “Two-dimensional imaging of soot volume fraction by the use of laser-induced incandescence”. *Applied Optics*, Vol. 34, pp. 7083–7091, 1995. **Aparece en: Cap.3**–[49].
- [118] Ouchi H., Chikahisa T. y Murayama T. “A quantitative analysis of schlieren photography for an internal combustion engine diagnostics”. *SAE paper 910730*, 1991. **Aparece en: Cap.5**–[15].
- [119] Pal N.K. y Pal S.K. “A review on image segmentation techniques”. *Pattern Recognition*, Vol. 26, pp. 1277–1294, 1993. **Aparece en: Cap.3**–[99], **Cap.4**–[12].
- [120] Palomares A. *Análisis de imágenes de chorros diesel*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2001. **Aparece en: Cap.1**–[1], **Cap.3**–[18], **Cap.4**–[1], **Cap.5**–[35], **Cap.6**–[14].
- [121] Pastor J.V. *Estudio experimental del movimiento del aire en un motor diesel de inyección directa mediante anemometría laser doppler*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1996. **Aparece en: Cap.2**–[18], **Cap.3**–[5].

- [122] Pastor J.V., Arrègle J., García J.M. y Zapata L.D. “Segmentation of diesel spray images with log-likelihood ratio test algorithm for non-Gaussian distributions”. *Applied Optics*, Vol. 46, pp. 888–899, 2007. **Aparece en: Cap.3**–[103].
- [123] Pastor J.V., Arrègle J. y Palomares A. “Diesel spray image segmentation with a likelihood ratio test”. *Applied Optics*, Vol. 40, pp. 1–10, 2001. **Aparece en: Cap.3**–[109], **Cap.4**–[15], **Cap.5**–[36].
- [124] Pastor J.V., García J.M., Pastor J.M. y Buitrago J.E. “Analysis of calibration techniques for laser-induced incandescence measurements in flames”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, pp. 3279–3288, 2006. **Aparece en: Cap.3**–[50].
- [125] Pastor J.V., García J.M., Pastor J.M. y Zapata L.D. “Visualization of the spatial and temporal evolution of a diesel flame”. *Fifth Symposium Towards Clean Diesel Engines. Lund, Sweden*, 2005. **Aparece en: Cap.3**–[92], **Cap.6**–[19].
- [126] Pastor J.V., García J.M., Pastor J.M. y Zapata L.D. “Evaporating diesel spray visualization using a double-pass shadowgraphy/schlieren imaging”. *SAE paper 2007-24-0026*, 2007. **Aparece en: Cap.5**–[39].
- [127] Pastor J.V., García-Oliver J.M., Pastor J.M. y Ramírez-Hernández J.G. “Experimental facility and methodology for systematic studies of cold startability in direct injection diesel engines”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 20, 2009. **Aparece en: Cap.3**–[94], **Cap.6**–[27].
- [128] Pastor J.V., Juliá J.E., Zapata L.D. y Buitrago J.E. “Visualización y procesado digital de imágenes para la caracterización macroscópica del chorro diesel isoterma”. *XV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Cádiz*, 2002. **Aparece en: Cap.2**–[7], **Cap.4**–[2].
- [129] Pastor J.V., López J.J., Juliá J.E. y Benajes J.V. “Planar laser-induced fluorescence fuel concentration measurements in isothermal diesel sprays”. *Optics Express*, Vol. 10, pp. 309–323, 2002. **Aparece en: Cap.3**–[3].
- [130] Pastor J.V., Payri R., Gimeno J. y Nerva J.G. “Experimental study on RME blends: liquid-phase fuel penetration, chemiluminescence, and soot luminosity in diesel-like conditions”. *Energy and Fuels*, 2009 (Aceptado para su publicación). **Aparece en: Cap.6**–[29].

- [131] Pastor J.V., Payri R., López J.J. y Juliá J.E. “Effect of injector nozzle geometry of diesel engines on the macroscopic spray characteristics by means of optical techniques”. *Fuel injection Systems Conference, IMechE*, 2003. **Aparece en: Cap.2**–[8], **Cap.3**–[88], **Cap.4**–[3].
- [132] Paulsen H. y Valland H. “A new method for time-resolved full-field measurement of local average gas concentration during fuel-injection”. *SAE paper 960829*, 1996. **Aparece en: Cap.5**–[4].
- [133] Payri F., Benajes J., González C.A. y Donde R. “The effects of injector hole convergence on diesel combustion and emissions”. *Internal Journal of Vehicle Design*, Vol. 36, pp. 385–402, 2004. **Aparece en: Cap.2**–[6].
- [134] Payri F., Bermúdez V., Payri R. y Salvador J. “The influence of cavitation on the internal flow and the spray characteristics in diesel injection nozzles”. *Fuel*, Vol. 83, pp. 419–431, 2004. **Aparece en: Cap.3**–[89].
- [135] Payri F., Desantes J.M. y Arrègle J. “Characterization of D.I. diesel sprays in high density conditions”. *SAE paper 960774*, 1996. **Aparece en: Cap.5**–[33].
- [136] Payri F., Desantes J.M. y Pastor J.V. “LDV measurements of the flow inside the combustion chamber of a 4-valve D. I. diesel engine with axisymmetric piston-bowls”. *Experiments in fluids*, Vol. 22, pp. 118–128, 1996. **Aparece en: Cap.2**–[30], **Cap.3**–[80].
- [137] Payri F., Pastor J.V. y Arrègle J. “Endoscopic high speed visualization of injection and combustion processes in a DI diesel engine”. *Entropie*, Vol. 200, pp. 7–15, 1996. **Aparece en: Cap.3**–[84], **Cap.6**–[12].
- [138] Payri F., Pastor J.V., García J.M. y Pastor J.M. “Contribution to the application of two-colour imaging to Diesel combustion”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 18, pp. 2579–2598, 2007. **Aparece en: Cap.3**–[45], **Cap.6**–[3].
- [139] Payri F., Pastor J.V., Palomares A. y Juliá J.E. “Optimal feature extraction for segmentation of diesel spray images”. *Applied Optics*, Vol. 43, pp. 2102–2111, 2004. **Aparece en: Cap.3**–[110], **Cap.4**–[18].
- [140] Payri F., Pastor J.V., Pastor J.M. y Juliá J.E. “Diesel spray analysis by means of planar laser-induced exciplex fluorescence”. *International Journal of Engine Research*, Vol. 7, pp. 77–89, 2006. **Aparece en: Cap.3**–[26].

- [141] Payri F., Payri R., Salvador F.J. y Gimeno J. “Comparison between different hole to hole measurement techniques in a diesel injection nozzle”. *SAE paper 2005-01-2094*, 2005. **Aparece en: Cap.4**–[23].
- [142] Payri R., Salvador F.J., Gimeno J. y de la Morena J. “Effects of nozzle geometry on direct injection diesel engine combustion process”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 2051–2060, 2009. **Aparece en: Cap.6**–[28].
- [143] Payri R., Salvador F.J., Gimeno J. y Zapata L.D. “Diesel nozzle geometry influence on spray liquid-phase fuel penetration in evaporative conditions”. *Fuel*, Vol. 87, pp. 1165–1176, 2008. **Aparece en: Cap.2**–[5].
- [144] Pickett L.M. y Siebers D.L. “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.3**–[64].
- [145] Prasad A.K. “Particle image velocimetry”. *Current Science*, Vol. 79, pp. 51–60, 2000. **Aparece en: Cap.3**–[20].
- [146] Pratt W.K. *Digital image processing*. Wiley-Interscience Publication, 3rd ed., ISBN 0-471-37407-5, 2001. **Aparece en: Cap.4**–[19].
- [147] Reitz R.D. y Bracco F.V. “Mechanism of atomization of a liquid jet”. *Physics Fluids*, Vol. 25, pp. 1730–1742, 1982. **Aparece en: Cap.2**–[28].
- [148] Ricart L.M., Xin J., Bower G.R. y Reitz R.D. “In-cylinder measurement and modeling of liquid fuel spray penetration in a heavy-duty diesel engine”. *SAE paper 971591*, 1997. **Aparece en: Cap.3**–[85].
- [149] Rife J. y Heywood J.B. “Photographic and performance studies of diesel combustion with a rapid compression machine”. *SAE paper 740948*, 1974. **Aparece en: Cap.3**–[63].
- [150] Russ J.C. *The image processing handbook*. CRC press, 3rd ed., ISBN 0-8493-2532-3, 1998. **Aparece en: Cap.3**–[96], **Cap.4**–[5], **Cap.5**–[42].
- [151] Sahoo P.K., Soltani S. y Wong K.C. “A survey of thresholding techniques”. *Graphical Models and Image Processing*, Vol. 41, pp. 233–260, 1988. **Aparece en: Cap.4**–[17].
- [152] Salvador 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, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003. **Aparece en: Cap.2**–[10].
- [153] Schmalzing C.O., Stapf P., Maly R.R., Renner G., Stetter H. y Dwyer H.A. “A holistic hydraulic and spray model—Liquid and vapor phase penetration of fuel sprays in D. I. diesel engines”. *SAE paper 1999-01-3549*, 1999. **Aparece en: Cap.5**–[12].
- [154] Schraml S., Will S., Leipertz A., Zens T. y D’Alfonso N. “Performance characteristics of TIRE-LII soot diagnostics in exhaust gases of diesel engines”. *SAE paper 2000-01-2002*, 2000. **Aparece en: Cap.3**–[51].
- [155] Schulz C., Gronki J. y Andersson S. “Multi-species laser-based imaging measurements in a Diesel spray”. *SAE paper 2004-01-1917*, 2004. **Aparece en: Cap.3**–[24].
- [156] Scott W.M. “Understanding Diesel Combustion Through the Use of High-Speed Moving Pictures in Color”. *SAE paper 690002*, 1969. **Aparece en: Cap.3**–[62].
- [157] Senda J., Kobayashi M., Tanabe Y. y Fujimoto H. “Visualization and quantitative analysis of the fuel vapor concentration in diesel spray”. *JSAE Review*, Vol. 15, pp. 149–156, 1994. **Aparece en: Cap.3**–[27].
- [158] Seneschal J., Maurin B., Champoussin J.C. y Ducottet C. “A fully automatic system for the morphology characterization of high pressure diesel sprays”. *SAE paper 2004-01-0025*, 2004. **Aparece en: Cap.3**–[108], **Cap.4**–[10].
- [159] Settles G.S. *Schlieren and shadowgraph techniques: Visualizing phenomena in transparent media*. Springer-Verlag, ISBN 3-540-66155-7, 2001. **Aparece en: Cap.3**–[29], **Cap.5**–[3].
- [160] Shao J., Yan Y., Greeves G. y Smith S. “Quantitative characterization of diesel sprays using digital imaging techniques”. *Measurement Science and Technology*, Vol. 14, pp. 1110–1116, 2003. **Aparece en: Cap.3**–[104], **Cap.4**–[9].
- [161] Sharma G. y Trussell J.T. “Digital color imaging”. *IEEE Transactions on Image processing*, Vol. 6, pp. 901–932, 1997. **Aparece en: Cap.3**–[74].
- [162] Shiozaki T., Nakajima H., Yokota H. y Miyashita A. “The visualization and its analysis of combustion flame in DI diesel engine”. *SAE paper 980141*, 1998. **Aparece en: Cap.3**–[78], **Cap.5**–[27].

- [163] Shiozaki T., Suzuki T. y Shimoda M. “Observation of combustion process in D. I. diesel engine via high speed direct and schlieren photography”. *SAE paper 800025*, 1980. **Aparece en:** **Cap.3**–[32], **Cap.5**–[16].
- [164] Shoji H., Saima A. y Shiino K. “Simultaneous measurement of light emission and absorption behavior of unburned gas during knocking operation”. *SAE paper 932754*, 1993. **Aparece en:** **Cap.3**–[36], **Cap.6**–[9].
- [165] Siebers D.L. “Liquid-phase fuel penetration in diesel sprays”. *SAE paper 980809*, 1998. **Aparece en:** **Cap.2**–[19], **Cap.3**–[9], **Cap.5**–[21].
- [166] Siebers D.L. “Scaling liquid-phase fuel penetration in diesel sprays based on mixing-limited vaporization”. *SAE paper 1999-01-0528*, 1999. **Aparece en:** **Cap.2**–[34].
- [167] Siebers D.L., Higgins B. y Pickett L. “Flame lift-off on direct-injection diesel fuel jets: Oxygen concentration effects”. *SAE paper 2002-01-0890*, 2002. **Aparece en:** **Cap.2**–[53], **Cap.6**–[8].
- [168] Smallwood G.J. y Gülder Ö.L. “Views on the structure of transient diesel sprays”. *Atomization and sprays*, Vol. 10, pp. 355–386, 2000. **Aparece en:** **Cap.5**–[19].
- [169] Soare V.T. *Phase doppler measurement in diesel dense sprays: optimization of measurements and study of the orifice geometry influence over the spray at microscopic level*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2007. **Aparece en:** **Cap.2**–[39].
- [170] Suzuki T. y Shiozaki T. “A new combustion system for the diesel engine and its analysis via high speed photography”. *SAE paper 770674*, 1977. **Aparece en:** **Cap.3**–[81].
- [171] Svensson K.I., Mackrory A.J., Richards M.J. y Tree D.R. “Calibration of an RGB, CCD camera and interpretation of its two-color images for KL and temperature”. *SAE paper 2005-01-0648*, 2005. **Aparece en:** **Cap.3**–[48].
- [172] Tani Y., Saito A. y Yamada M. “Visualization of the evaporating process of the fuel spray in the cylinder of a diesel engine”. *JSME International Journal, Series II*, Vol. 32, pp. 673–678, 1989. **Aparece en:** **Cap.3**–[31], **Cap.5**–[26].

- [173] Tennison P.J., Georjon T.L., Farrell P.V. y Reitz R.D. “An experimental and numerical study of sprays from a common rail injection system for use in an HSDI diesel engine”. *SAE paper 980810*, 1998. **Aparece en: Cap.5**–[25].
- [174] Tinaut F.V. *Contribución al estudio del proceso de combustión en motores de encendido por compresión de inyección directa*. Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1986. **Aparece en: Cap.2**–[2].
- [175] Tinaut F.V., Melgar A., Castro F., Sánchez M.L. y Giménez B. “A method to determine liquid concentration in non-stationary axisymmetric sprays”. *Experiments in Fluids*, Vol. 23, pp. 299–305, 1997. **Aparece en: Cap.2**–[40], **Cap.3**–[16].
- [176] Tinaut F.V., Melgar A., Reyes M., Pérez J.F. y Horrillo A. “Caracterización del proceso de combustión del gas pobre obtenido tras la gasificación de biomasa lignocelulósica para su uso en motores de combustión interna alternativos”. *8º Congreso iberoamericano de ingeniería mecánica (CIBIM8)*, 2007. **Aparece en: Cap.3**–[41].
- [177] van de Hulst H.C. *Light scattering by small particles*. Dover Publications, Inc., ISBN 0-486-64228-3, 1957. **Aparece en: Cap.3**–[6], **Cap.5**–[2].
- [178] Vander-Wal R.L. “Laser-induced incandescence: detection issues”. *Applied Optics*, Vol. 35, pp. 6548–6559, 1996. **Aparece en: Cap.3**–[52].
- [179] Verbiezen K., Donkerbroek A.J., van Vliet A.P., Meerts W.L., Klein-Douwel R.J.H., Dam N.J. y ter Meulen J.J. “Laser beam attenuation in LIF measurements on NO in a diesel engine”. *Proceedings of the European Combustion Meeting*, 2003. **Aparece en: Cap.3**–[58].
- [180] Verhoeven D., Vanhemelryck J-L. y Baritaud T. “Macroscopic and ignition characteristics of High-Pressure sprays of single-component fuels”. *SAE paper 981069*, 1998. **Aparece en: Cap.5**–[22].
- [181] Weber J., Spiekermann P. y Peters N. “Model calibration for spray penetration and mixture formation in high pressure fuel spray using a micro-genetic algorithm and optical data”. *SAE paper 2005-01-2099*, 2005. **Aparece en: Cap.5**–[37].
- [182] Werlberger P. y Cartellieri W.P. “Fuel Injection and Combustion Phenomena in a High Speed DI Diesel Engine Observed by Means of Endoscopic High Speed Photography”. *SAE paper 870097*, 1987. **Aparece en: Cap.3**–[83].

- [183] Winklhofer E., Fuchs H. y Philipp H. “Diesel spray combustion – An optical imaging analysis”. *SAE paper 930862*, 1993. **Aparece en: Cap.3–[65]**.
- [184] Yamaguchi I., Nakahira T., Komori M. y Kabayashi S. “An image analysis of high speed combustion photographs for D. I. diesel engine with high pressure fuel injection”. *SAE paper 901577*, 1990. **Aparece en: Cap.3–[33], Cap.5–[17]**.
- [185] Yeh C., Kamimoto T., Kosaka H. y Kobori S. “Quantitative measurement of 2-D fuel vapor concentration in a transparent spray via laser-induced fluorescence technique”. *SAE paper 941953*, 1994. **Aparece en: Cap.3–[28]**.
- [186] Zakrzewski S., Milton B.E., Pianthong K. y Behnia M. “Supersonic liquid fuel jets injected into quiescent air”. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp. 833–840, 2004. **Aparece en: Cap.5–[34]**.
- [187] Zhao H. y Ladommatos N. “Optical diagnostics for soot and temperature measurement in diesel engines”. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 24, pp. 221–255, 1998. **Aparece en: Cap.3–[44]**.
- [188] Zhao H. y Ladommatos N. *Engine combustion instrumentation and diagnostics*. Society of Automotive Engineers, ISBN 0-7680-0665-1, 2001. **Aparece en: Cap.2–[47], Cap.3–[8], Cap.5–[18], Cap.6–[1]**.