TEMAS AVANZADOS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

F. Payri/J.Mª. Desantes

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL CHORRO DIÉSEL EN CAMPO PRÓXIMO

motores térmicos

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

JOAQUÍN DE LA MORENA

EDITORIAL REVERTÉ

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL CHORRO DIÉSEL EN CAMPO PRÓXIMO

TEMAS AVANZADOS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

F. Payri/J.Mª. Desantes

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL CHORRO DIÉSEL EN CAMPO PRÓXIMO

JOAQUÍN DE LA MORENA

Dr. Ingeniero Industrial

Profesor Ayudante Doctor
CMT - Motores Térmicos
Universitat Politècnica de València

EDITORIAL REVERTÉ S.A.
www.reverte.com

Directores de la Serie

Francisco Payri González
Dr. Ingeniero Industrial

José María Desantes Fernández
Dr. Ingeniero Industrial

Catedráticos de Universidad
CMT – Motores Térmicos
Universidad Politécnica de Valencia

Estudio del comportamiento del chorro diésel en campo próximo

Copyright © Joaquín de la Morena

EDITORIAL REVERTÉ, S. A., 2015

Edición en e-book:
© Editorial Reverté. S.A., 2015
ISBN: 978-84-291-9442-5

Edición en papel:
© Editorial Reverté. S.A., 2014
ISBN: 978-84291-4721-6

Propiedad de:
EDITORIAL REVERTÉ, S. A.
Loreto, 13-15, Local B
08029 Barcelona
Tel: (34) 93 419 33 36
reverte@reverte.com
www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

1433

Prólogo

Me complace poder presentar este trabajo de investigación realizado en el grupo CMT-Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia. En particular, en este libro se presenta una nueva técnica experimental para caracterizar el comportamiento del chorro diésel en campo próximo, realizando un estudio exhaustivo de las características del mismo bajo distintas condiciones del flujo interno en toberas de inyección.

El trabajo desarrollado en el ámbito de este libro combina la experimentación con el análisis puramente teórico de los fenómenos involucrados con el proceso de inyección diésel. Una vez presentadas las características principales de la técnicas experimentales utilizadas, con especial énfasis en la técnica que permite la caracterización del chorro en campo próximo, el trabajo se divide en dos partes: en primer lugar, se utiliza esta técnica para el estudio del fenómeno de la cavitación en los orificios de descarga de una tobera de inyección, así como las repercusiones que tiene sobre la formación del chorro; por otro lado, un segundo estudio se centra en el análisis del comportamiento del chorro en condiciones no cavitantes, relacionando los parámetros del mismo con números adimensionales tradicionales en este tipo de estudios, y evaluando el proceso de mezcla a través de un modelo unidimensional del chorro diésel.

En este libro se presentan aportaciones relevantes y originales que ayudarán a la mejor comprensión de la influencia de las características del flujo interno sobre el posterior desarrollo del chorro diésel, con un especial énfasis en el estudio del proceso de atomización primaria, difícilmente abordable con otro tipo de técnicas. Partes de este trabajo han sido publicadas en diversas revistas internacionales de reconocido prestigio como *Fuel*, *International Journal of Heat and Fluid Flow* o *Experiments in Fluids*, lo que da una muestra de la calidad del trabajo realizado y de la relevancia del mismo. Además, este trabajo se ha desarrollado en el marco de diversos proyectos de investigación de caracter público, y en paralelo al mismo se han llevado a cabo varios trabajos de investigación en el ámbito de la inyección diésel para empresas del sector como PSA Peugeot-Citroën, Delphi Diesel Systems o General Motors.

Finalmente, quisiera dedicar unas líneas para presentar al autor, con el que he tenido la enorme satisfacción de compartir muchas horas de estudio y trabajo.

El Dr. Joaquín de la Morena cursó los estudios de Ingeniería Industrial en la Universidad de Castilla la Mancha, finalizándolos en el año 2006. Posteriormente, comenzó los estudios de posgrado en la Universitat Politècnica de València, donde se doctoró con Sobresaliente *cum laude* en Junio del año 2011, siéndole concedido el Premio Extraordinario de Tesis Doctoral en 2012. Continuó su carrera como

investigador primero la Universidad de Wisconsin-Madison (EEUU) y después en General Motors Powertrain-Europe (Italia), antes de retornar en Octubre de 2015 a la Universitat Politècnica de Valéncia, donde actualmente ejerce como Profesor Ayudante Doctor.

Francisco Javier Salvador Rubio
Profesor Titular de Universidad
CMT-Motores Térmicos
Universidad Politécnica de Valencia

Índice general

Índice general **vii**

Índice de tablas **xi**

Lista de símbolos **xiii**

1 Introducción **1**
1.1. Justificación y objetivos 1
1.2. Antecedentes 3
1.3. Sobre este libro 4
Bibliografía 6

2 Fundamentos sobre el proceso de inyección **9**
2.1. Introducción 9
2.2. El sistema Common-Rail 11
2.3. El flujo interno en toberas de inyección 16
2.3.1. Geometría de una tobera de inyección 16
2.3.2. Morfología del flujo en toberas de inyección 18
2.3.3. Turbulencia en el flujo interno 19
2.3.4. Coeficientes adimensionales utilizados para el estudio del flujo 21
2.4. El fenómeno de la cavitación 24
2.4.1. La visualización de la cavitación 25
2.4.2. Efectos de la cavitación sobre los coeficientes definitorios del flujo 29
2.4.3. Modelado fluidodinámico de la cavitación 35
2.5. El proceso de atomización 37
2.5.1. Regímenes de atomización 38
2.5.2. Análisis dimensional del proceso de atomización 39
2.5.3. Influencia de la velocidad de inyección 42

2.5.4. Otros mecanismos de atomización 44
2.5.5. Estudios experimentales más relevantes 45
2.6. Características del chorro diésel 48
2.6.1. Parámetros macroscópicos 48
2.6.2. Parámetros microscópicos 53
2.7. Conclusiones sobre el estado actual del conocimiento 55
Bibliografía 58

3 Técnicas experimentales 69
3.1. Introducción 69
3.2. Determinación de la geometría de toberas 70
3.2.1. Parámetros geométricos caracterizados 71
3.2.2. Validación de la técnica 73
3.3. Medida de tasa de inyección 74
3.3.1. Principio físico de la medida 74
3.4. Medida del flujo de la cantidad de movimiento 78
3.4.1. Fundamentos físicos de la medida 78
3.4.2. Descripción de la maqueta 80
3.5. Visualización del chorro en campo próximo 82
3.5.1. Maqueta presurizada de inyección 83
3.5.2. Configuración óptica 87
3.5.3. Procesado de las imágenes 90
3.6. Geometrías utilizadas y plan de trabajo 93
3.A. Anexo: Metodología detallada para el procesado de las imágenes . 95
3.A.1. Algoritmo para la detección del contorno 96
3.A.2. Parámetros obtenidos de la visualización a alta resolución . 97
3.A.3. Parámetros obtenidos de la visualización a media resolución 99
Bibliografía 101

4 Influencia de la cavitación sobre el proceso de atomización 103
4.1. Introducción 103
4.2. Estudio con geometrías simplificadas 104
4.2.1. Caracterización del flujo másico estacionario 104
4.2.2. Visualización de la cavitación en la descarga 108
4.3. Extensión a una tobera mono-orificio 114
4.3.1. Caracterización hidráulica 115
4.3.2. Visualización en atmósfera líquida 120
4.3.3.] 122
4.3.4. Caracterización del perfil del chorro cercano 130
4.4. Conclusiones 137
Bibliografía 140

5 Estudio del chorro no cavitante en campo próximo 143
5.1. Introducción 143
5.2. Caracterización hidráulica 144
5.3. Estructura del chorro estacionario 147
5.3.1. Ángulo de apertura 148
5.3.2. Longitudes características 151
5.3.3. Oscilaciones del perfil 160
5.4. Evaluación del proceso de mezcla mediante un modelo 1D 165
5.4.1. Modelado unidimensional del chorro diésel 166
5.4.2. Determinación del número de Schmidt 168
5.4.3. Estudio de la mezcla aire-combustible 178
5.5. Estudio del chorro en condiciones transitorias 179
5.5.1. Análisis cualitativo de las imágenes obtenidas 181
5.5.2. Estudio de la penetración del frente del chorro 183
5.6. Conclusiones 186
Bibliografía 189

6 Conclusiones y desarrollos futuros 193
6.1. Conclusiones 193
6.2. Desarrollos futuros 198

Bibliografía 201

Índice de tablas

2.1. Dimensiones y parámetros geométricos habituales en orificios de inyección. 18
2.2. Resumen de expresiones existentes en la bibliografía para el coeficiente de descarga en función del número de Reynolds. 23
2.3. Resúmen de criterios para distinguir entre los distintos regímenes de atomización. 42
2.4. Valores de la constante de proporcionalidad en las correlaciones para la penetración del chorro, según la expresión 2.26. 52

3.1. Características de la lente biconvexa. 90
3.2. Distancias correspondientes a las configuraciones ópticas utilizadas. . . 91
3.3. Parámetros geométricos de los modelos simplificados de tobera. 93
3.4. Parámetros geométricos de las toberas mono-orificio. 93

4.1. Correlación para el coeficiente de descarga en función del número de Reynolds. 107
4.2. Números de cavitación críticos para las distintas toberas y presiones de inyección estudiadas. 108
4.3. Correlación para el número de cavitación crítico obtenido de los ensayos de visualización 112
4.4. Condiciones críticas de cavitación según el criterio de Nurick. 117
4.5. Condiciones de aparición de las burbujas de cavitación 121

5.1. Correlación para el ángulo de apertura. 152
5.2. Correlación para la longitud no perturbada. 156
5.3. Correlación para la longitud de transición. 161
5.4. Correlación para la magnitud de las oscilaciones del perfil. 162
5.5. Condiciones experimentales para los ensayos de rayos-x. 172
5.6. Correlación para la penetración del chorro en campo próximo. 185

Lista de símbolos

Griegos

α	Constante de ajuste para la gaussiana del perfil radial de velocidad en un chorro estacionario
$\mu(k)$	Nivel de intensidad medio existente en la clase C_1
μ_f	Viscosidad dinámica del combustible
μ_m	Coeficiente de extinción del gasoil para la longitud de onda de los rayos-x [m/kg]
μ_T	Nivel de intensidad medio existente en una imagen
ν_f	Viscosidad cinemática del combustible
$\omega(k)$	Valor de la probabilidad asociada a la clase C_1
ρ_a	Densidad del gas de descarga
$\rho_L(x,r)$	Densidad local del combustible
ρ_f	Densidad del combustible
σ	Tensión superficial del combustible
σ_B^2	Varianza entre las clases C_1 y C_2
θ	Ángulo de apertura del chorro
θ_u	Ángulo de chorro definido en función del perfil radial de velocidad

Latinos

A	Constante relativa a la geometría del orificio en las correlaciones para el ángulo de apertura
a	Velocidad del sonido
A_e	Área en la entrada del orificio de descarga
A_o	Área en la salida del orificio de descarga

A_{ef} Área efectiva de salida del combustible

b Puntos correspondientes al contorno del chorro detectado por el programa de procesado

BO Magnitud de las oscilaciones del perfil del chorro en la zona cercana al orificio de salida

$C(x,r)$ Concentración másica local del chorro

C_1 Conjunto de píxeles de una imagen correspondientes al chorro

C_2 Conjunto de píxeles de una imagen correspondientes al fondo de la misma

C_a Coeficiente de área

C_c Coeficiente de contracción debido a la cavitación

C_d Coeficiente de descarga

C_{eje} Concentración del chorro en una posición axial determinada

C_{L_p} Constante de proporcionalidad entre la longitud no perturbada y el diámetro equivalente

C_m Coeficiente de momento

$C_{vo}(x,r)$ Concentración o fracción volumétrica local en el chorro

C_v Coeficiente de velocidad

D Coeficiente de difusividad másica del combustible

D_e Diámetro de entrada del orificio

D_o Diámetro de salida del orificio

D_p Distancia media entre dos picos o dos valles consecutivos del perfil del chorro en la zona cercana al orificio de salida

D_{ef} Diámetro efectivo

D_{eq} Diámetro equivalente

ET Tiempo de excitación del inyector

E Error de truncación en la estimación de la derivada del perfil del chorro para el cálculo de la distancia entre picos

f Distancia focal de la lente biconvexa

F_t Función de Taylor

H Histéresis en la aparición de las burbujas de cavitación

h Umbral que marca la frontera entre las clases C_1 y C_2

h_s Tamaño del sensor CCD

h_w Tamaño de la ventana de visualización

I Intensidad del haz de rayos-x tras su paso por el chorro [fotones/s o W]

i Contador que marca cada uno de los niveles de intensidad existentes en la imagen

I_o Intensidad del haz de rayos-x a la salida de la fuente [fotones/s o W]

j Contador de la serie que sirve para la definición de la magnitud de las oscilaciones

k–factor Factor de conicidad del orificio

K Número de cavitación

K_u Constante universal para el cálculo de la penetración a partir de la cantidad de movimiento

$K^{II}_{bcrit,v}$ Número de cavitación para el cual se produce la desaparición de las burbujas de cavitación en la descarga

$K_{crit,v}$ Número de cavitación para el cual aparecen las primeras burbujas de cavitación en la descarga

L Longitud del orificio

L_b Longitud de rotura del chorro

L_e Longitud de entrada hasta alcanzar el flujo totalmente desarrollado

L_p Longitud de la zona no perturbada del chorro

L_t Longitud de transición o distancia a la que se alcanza el valor de ángulo estacionario

$\dot{M}(x)$ Cantidad de movimiento del chorro integrada en una posición axial x

$\dot{m}_B$ Gasto másico predicho por la ecuación de Bernoulli

$\dot{m}_f$ Gasto másico de combustible suministrado por la tobera

$\dot{M}_o$ Cantidad de movimiento en el orificio de salida de la tobera

M Relación de magnificación/aumento

m Masa

M' Densidad del combustible por unidad de área a lo largo del camino óptico del haz de rayos-x [kg/m]

$m_f(x,r)$ Masa local de combustible

M_f Cantidad de movimiento del chorro

N Número total de píxeles existentes en una imagen

n Número total de puntos que definen el contorno del chorro

n_i Número de píxeles que tienen un nivel de intensidad i

Oh Número adimensional de Ohnesorge

p Presión

p_b Presión de descarga

p_i Presión de inyección

p_{vap} Presión de vapor

$p_{bcrit,v}$ Presión de descarga en la que aparecen las primeras burbujas de cavitación a la salida del orificio

p_{bcrit} Valor de contrapresión en que aparece el colapso de flujo másico
R Radio total del chorro en una posición axial determinada
r Coordenada radial del chorro respecto a su eje
r_e Radio de acuerdo a la entrada del orificio
r_B Radio de una burbuja de cavitación
Re Número de Reynolds
S Penetración del chorro
S_1 Distancia entre el plano de enfoque y la lente
S_2 Distancia entre la lente y el sensor CCD
T Temperatura
t_b Tiempo para el cual se produce el cambio en el comportamiento de la penetración del frente del chorro
Ta Número adimensional de Taylor
$u(x,r)$ Velocidad local del chorro
u_B Velocidad de salida del combustible predicha por la ecuación de Bernoulli
u_{ef} Velocidad efectiva de salida del combustible
$u_{eje}(x)$ Velocidad en el eje del chorro en la posición axial x
$V_a(x,r)$ Volumen local ocupado por el aire
$V_f(x,r)$ Volumen local ocupado por el combustible
We Número adimensional de Webber
x Coordenada axial del chorro respecto al orificio de salida
$\bar{x_j}$ j-ésimo punto que define el perfil promedio del chorro
x_j j-ésimo punto que define el contorno del chorro detectado mediante el procesado de la imagen
z Dirección del haz de rayos-x

Capítulo 1

Introducción

1.1. Justificación y objetivos

Uno de los mayores retos en el ámbito de los motores diésel en los últimos años es la reducción de las emisiones contaminantes. En este sentido una de las acciones activas consiste en mejorar cada vez más el proceso de formación de la mezcla aire-combustible, el cual determina en gran medida el posterior desarrollo de la combustión. Por ello, continuamente surgen modificaciones de los sistemas de inyección que posibilitan la fabricación de motores cada vez más eficientes y con un menor impacto medioambiental.

En este sentido, numerosos estudios han sido llevados a cabo acerca del comportamiento del chorro diésel. Es habitual que muchos de estos estudios se centren en el chorro libre en condiciones no evaporativas, que si bien no es extrapolable directamente a la inyección diésel en condiciones reales de funcionamiento, es un caso más sencillo que permite obtener conclusiones importantes acerca del proceso de formación de la mezcla aire-combustible. Como resultado de estos estudios puede verse que muchas de las características del chorro diésel en posiciones relativamente alejadas del orificio de salida pueden ser predichas de forma satisfactoria a partir de parámetros caracterizables experimentalmente, como la cantidad de movimiento con que el chorro es inyectado o el ángulo del mismo. A pesar de ello, se plantean dos importantes obstáculos:

- Para poder optimizar el diseño de los sistemas de inyección, es necesario establecer de antemano la relación existente entre la geometría de las toberas, las características del flujo a la salida de los orificios y el ángulo del chorro.

- Debido a las pequeñas dimensiones de la cámara de combustión en los motores actuales, así como a la exigencia de tener tiempos de mezcla y de combustión cada vez menores, los fenómenos relacionados con la atomización y el comportamiento del chorro en las cercanías del orificio cobran cada vez mayor importancia.

Por tanto, se llega a la conclusión de que es necesario comprender lo más profundamente posible la física del flujo en el interior de los orificios de descarga, así como su interacción con el posterior desarrollo del chorro. Sin embargo, y a pesar de la importancia de su conocimiento, la complejidad de su estudio hace que existan aún incertidumbres importantes respecto al flujo interno en las toberas de inyección diésel. Esta complejidad es debida principalmente a los siguientes factores:

- Las pequeñas dimensiones de los orificios. Éstos suelen tener longitudes características en torno a un milímetro y diámetros que rondan la décima del milímetro.
- Alta velocidad del flujo. Para favorecer los proceso de atomización y mezcla aire-combustible, el chorro debe ser inyectado a alta velocidad. Por ello, la velocidad del flujo en el interior de los orificios puede llegar a varios cientos de metros por segundo en condiciones reales de funcionamiento.
- El proceso de inyección en condiciones reales es en muchas ocasiones considerablemente transitorio, con duraciones de inyección generalmente del orden del milisegundo o inferiores. Por este motivo el flujo está influenciado en gran medida por la dinámica de la aguja, sobre todo durante el inicio y el final de la inyección, y sometido a condiciones de temperatura y presión muy variables.

Además de estos factores, existe un fenómeno relacionado con el flujo en las toberas de inyección diésel que complica aún más su estudio: la cavitación. Este fenómeno ha sido detectado en toberas con geometría cilíndrica, y tiene una influencia decisiva tanto en el flujo interno como en el posterior desarrollo del chorro. Sin embargo, la mayor parte de los estudios experimentales que han tratado de estudiar la cavitación han sido realizados con geometrías transparentes y simplificadas, donde las características del flujo son distintas a las existentes en una tobera de inyección diésel real.

En lo que se refiere al proceso de atomización del chorro, éste ha sido ampliamente estudiado a lo largo de décadas. Sin embargo, la mayor parte de estos estudios han sido realizados en condiciones bastante alejadas de las existentes

actualmente en un chorro diésel, tanto en términos de diámetro como de velocidad de inyección. Actualmente, el mayor desarrollo de las técnicas ópticas y del cálculo fluidodinámico turbulento (en especial con herramientas *Large Eddy Simulation* o *Direct Numerical Simulation*) permiten obtener información acerca de la estructura del chorro en las cercanías del orificio en condiciones más realistas.

En el presente trabajo se utilizará una técnica de visualización a alta resolución para tratar de relacionar las características del flujo interno con el comportamiento del chorro en campo próximo. El flujo interno será estudiado a partir de la medición de la tasa de inyección y el flujo de cantidad de movimiento del chorro, especialmente en condiciones estacionarias. Así mismo, se caracterizará la cavitación visualizando las burbujas de gasoil que abandonan el orificio de salida de las toberas bajo una serie de condiciones de inyección. Posteriormente, se utilizará una tobera cilíndrica para establecer la influencia que tiene la cavitación sobre el proceso de atomización y la estructura macroscópica del chorro. Finalmente, un conjunto de 3 toberas cónicas de distinto diámetro servirá para caracterizar el chorro cercano en condiciones no cavitantes, explorando la capacidad de un modelo unidimensional para reproducir las características del chorro en sus primeros milímetros.

1.2. Antecedentes

Dada la gran importancia del estudio del proceso de inyección en el comportamiento global del motor diésel, el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la UPV tiene una acreditada experiencia de investigación en este campo, tanto en lo que se refiere al comportamiento hidráulico del conjunto inyector-tobera [1–4] como al estudio teórico-experimental del chorro diésel [5–12] y sus implicaciones sobre el proceso de combustión [13–15].

Dentro de estos trabajos, existen dos que suponen claros antecedentes del trabajo desarrollado en este libro. El primero de ellos es el elaborado por Salvador [2] titulado «*Estudio teórico experimental de la influencia de la geometría de toberas de inyección diésel sobre las características del flujo interno y del chorro*». En su Tesis, Salvador realiza un profundo estudio acerca de la influencia de la geometría de la tobera en su comportamiento hidráulico, así como el comportamiento macroscópico del chorro. En particular, en este estudio se utilizan herramientas tanto experimentales como computacionales para caracterizar la cavitación en un amplio elenco de geometrías, relacionando las condiciones de aparición de la cavitación con los parámetros geométricos más importantes a través de correlaciones, así como de las propiedades del combustible. Las correlaciones han sido obtenidas a partir de los resultados del cálculo fluidodinámico, y gracias a la uti-

lización de un diseño de experimentos de tipo Taguchi. Además, se vio como el ángulo macroscópico del chorro aumentaba con la aparición de la cavitación.

El segundo estudio que puede ser tomado como base para la presente publicación es el desarrollado por Gimeno [4], que lleva por título «*Desarrollo y aplicación de la medida del flujo de cantidad de movimiento de un chorro diésel*». En este trabajo se pone a punto una técnica experimental que permite caracterizar en diversas condiciones de inyección el flujo de cantidad de movimiento del chorro a la salida del orificio. Este parámetro se muestra como uno de los más importantes a la hora de caracterizar el comportamiento macroscópico del chorro. Además, se muestra cómo, en combinación con la medida de la tasa de inyección, es posible caracterizar las condiciones del flujo a la salida de la tobera, tanto en términos de velocidad de salida como de diámetro efectivo del mismo. Por último, se muestra la influencia que tiene la cavitación sobre el comportamiento hidráulico de la tobera.

1.3. Sobre este libro

En este libro se trata de estudiar la influencia de las características del flujo interno sobre el desarrollo del chorro diésel en campo próximo. En este sentido se utilizarán una serie de herramientas que permitirán estudiar de forma detallada tanto el comportamiento hidráulico del sistema de inyección como la estructura del chorro formado a la salida del orificio. De especial interés resulta la técnica de visualización a alta resolución, desarrollada especialmente para el estudio del chorro en campo próximo. Este estudio será llevado a cabo tanto en régimen cavitante como no cavitante, a fin de abarcar cualquier escenario posible en el ámbito del motor diésel.

Como primer paso en el desarrollo del presente estudio, y a modo de revisión bibliográfica, en el **capítulo 2** se hará un resumen de los aspectos más importantes relacionados con la inyección diésel. Tras una breve introducción acerca de la tecnología de los sistemas de inyección actuales se realiza un repaso detallado de los estudios más relevantes respecto al flujo interno en toberas de inyección diésel. En primer lugar se tratará el caso no cavitante, definiendo los coeficientes adimensionales que servirán para analizar el estado del flujo a la salida del orificio y estableciendo la influencia que tienen las condiciones de inyección sobre ellos. A continuación se verá la influencia que tiene la aparición de la cavitación sobre las características del flujo en los orificios de descarga. Posteriormente se detallará el estado del arte acerca del proceso de atomización en chorros diésel, así como del comportamiento global del chorro.

En el **capítulo 3** se describirán las técnicas experimentales utilizadas a lo largo del estudio. En primer lugar se introducirá la metodología para la determinación

de la geometría interna de las toberas a partir de la obtención de moldes de silicona de las mismas. Los fundamentos de la caracterización de las condiciones del flujo a la salida de los orificios a partir de la medida de la tasa de inyección y el flujo de cantidad de movimiento serán tratados a continuación. Todas estas técnicas han sido previamente desarrolladas y validadas en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. El punto de mayor interés de este capítulo está en la descripción para la técnica de visualización en campo próximo, basada en la utilización de una lente biconvexa que permite aumentar el grado de magnificación de las imágenes. Para detectar el chorro se recurre a la visualización por iluminación trasera difusa, que permite la distinción entre dos fluidos o fases con distinto índice de refracción. En este sentido, la técnica será utilizada con dos objetivos distintos:

- Caracterización de la cavitación a la salida de los orificios de descarga. Se basa en la inyección sobre una atmósfera de gasoil presurizado hasta la presión de ensayo deseada. Una vez que se produce la cavitación, y siempre y cuando se encuentre en las condiciones necesarias como para llegar a la salida del orificio, la diferencia de índice de refracción entre la fase líquida y el vapor permite detectar la zona ocupada por las burbujas de cavitación.
- Visualización cercana del chorro. Se inyecta sobre una cámara llena con nitrógeno presurizado en la que se pueden reproducir las condiciones de presión y densidad existentes en una cámara de combustión real. Se utilizarán dos resoluciones distintas en la toma de imágenes para determinar diversos aspectos de la estructura del chorro en sus primeros milímetros.

Además de la descripción de estas técnicas se darán los detalles de las geometrías utilizadas en el estudio y el plan de trabajo seguido.

El **capítulo 4** trata de los resultados concernientes a la influencia de la cavitación sobre las características del chorro cercano. En primer lugar se validará la técnica de visualización de la cavitación en la descarga, previamente descrita, a través de un amplio elenco de modelos simplificados de tobera consistentes en láminas de acero inoxidable de 1 mm de espesor taladradas mediante láser. Esto servirá, además, para comparar las condiciones del colapso de flujo másico con las existentes a la hora de detectar las primeras burbujas de cavitación en la descarga. Después, esta técnica será utilizada sobre una tobera cilíndrica de 0.087 mm de diámetro de salida, especialmente seleccionada para que la transición entre régimen cavitante y no cavitante se dé en condiciones reproducibles en la maqueta de visualización.

A continuación se caracterizará la estructura del chorro para esta tobera cilíndrica con el fin de establecer las diferencias existentes en el chorro con o sin

cavitación. La caracterización de imágenes a resolución media permitirá estudiar la estructura del chorro desde un punto de vista global, incluyendo la caracterización del ángulo de apertura. Por otra parte, la visualización a alta resolución (hasta 1000 $^{\text{pixel}}/_{\text{mm}}$) servirá para estudiar con detalle las características del contorno del chorro en la interfase líquido-gas.

En el **capítulo 5** se estudiará el chorro cercano estacionario en ausencia de cavitación. Para ello se utilizarán tres toberas mono-orificio de distintos diámetros, con el fin de ver su influencia sobre los parámetros del chorro previamente estudiados en el capítulo anterior. También se estudiará el desarrollo del chorro en régimen transitorio, llevando a cabo una correlación para la predicción de la penetración en estas primeras etapas del proceso de inyección. Además, se utilizará un modelo de chorro unidimensional para estudiar algunos aspectos concernientes a la estructura interna del chorro.

Por último, en el **capítulo 6** se establecerán las conclusiones más importantes extraídas a partir de los resultados obtenidos en los capítulos anteriores. Además se expondrán algunos de los posibles trabajos futuros a llevar a cabo para seguir profundizando en el conocimiento de los aspectos relacionados con el presente trabajo.

Bibliografía

[1] RODRIGUEZ, P.: *Modelado del comportamiento hidrodinámico de sistemas de inyección directa Diesel*, Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2001.

[2] SALVADOR, F. J.: *Estudio teórico experimental de la influencia de la geometría de toberas de inyección diesel sobre las características del flujo interno y del chorro*, Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003.

[3] PLAZAS, A. H.: *Modelado unidimensional de inyectores common-rail Diesel*, Tesis Doctoral, E.T.S. Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2005.

[4] 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.

[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.