



TEMAS AVANZADOS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

F. Payri/J.M^a. Desantes

INFLUENCIA DE LA CAVITACIÓN SOBRE EL DESARROLLO DEL CHORRO DIESEL

CMT
motores térmicos



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE VALENCIA

JAVIER SALVADOR



EDITORIAL REVERTÉ

TEMAS AVANZADOS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

F. Payri/J.M^a. Desantes

INFLUENCIA DE LA CAVITACIÓN SOBRE EL DESARROLLO DEL CHORRO DIESEL

JAVIER SALVADOR

Dr. Ingeniero Industrial

Profesor Contratado Doctor
Departamento de Máquinas y Motores Térmicos
Universidad Politécnica de Valencia



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



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

**Influencia de la cavitación sobre el desarrollo
del chorro Diesel**

Copyright © Javier Salvador

Edición en papel:

© Editorial Reverté. S.A., 2007

ISBN: 978-84-291-4710-0

Edición en e-book:

© Editorial Reverté. S.A., 2020

ISBN: 978-84-291-9094-6

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.

Prólogo

Me resulta muy grato poder presentar este trabajo de investigación realizado en el seno del grupo CMT-Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia. En concreto, en este libro, se ha estudiado detalladamente la influencia de la geometría de la tobera del inyector sobre las características del flujo interno y el posterior desarrollo macroscópico del chorro Diesel isotermo.

El trabajo desarrollado combina de una manera exitosa la experimentación con análisis puramente teóricos apoyados con cálculo computacional mediante CFD. La investigación se lleva a cabo utilizando nuevas técnicas experimentales entre las que podemos citar la novedosa metodología para la obtención de las dimensiones internas de las toberas mediante moldes de silicona y la determinación de las condiciones críticas de cavitación. En paralelo con este estudio se han realizado numerosos proyectos de investigación tanto de carácter público como privados, entre los que cabe citar, debido a su relevancia y relación directa con el trabajo desarrollado, la colaboración con la empresa PSA Peugeot-Citroën.

Considero que en este trabajo se presentan aportaciones relevantes y originales que ayudarán a la mejor comprensión de la influencia de la geometría de las toberas, y del fenómeno de la cavitación en las mismas, sobre el desarrollo del chorro Diesel. Como prueba de esta afirmación se podrían citar numerosos artículos publicados en revistas internacionales por el Dr. Javier Salvador, algunos de los cuales han supuesto un hito para CMT-Motores Térmicos al ser la primera vez que el grupo publicaba en revistas de tan alto prestigio (Atomization and Sprays y FUEL).

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. Javier Salvador cursó los estudios de Ingeniería Industrial en la Universidad Politécnica de Valencia, finalizando estos en el año 1998. En esta misma Universidad realizó los estudios de postgrado, donde se doctoró con Sobresaliente *cum laude* en enero del año 2003. Un año después, como reconocimiento a su labor investigadora, recibió el premio extraordinario de Tesis

Doctoral. En la actualidad ocupa una plaza de Profesor Contratado Doctor en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia. Su actividad investigadora se realiza dentro del grupo CMT-Motores Térmicos y está encuadrada en la línea de inyección Diesel. Actualmente es el responsable del modelado unidimensional de sistemas de inyección y su labor investigadora se centra en la mejor comprensión de la física del chorro Diesel y su interacción con el aire, temas en los que el autor tiene publicados numerosos trabajos en revistas de prestigio y en congresos internacionales.

Raúl Payri Marín
Profesor Titular de Universidad
CMT-Motores Térmicos
Universidad Politécnica de Valencia

Índice General

Lista de símbolos	xi
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes y justificación.....	1
1.2 Sobre este libro	3
2 Características fundamentales del proceso de inyección Diesel	9
2.1 Introducción.....	9
2.2 Sistemas de inyección Diesel	10
2.2.1 Tipos de sistemas de inyección directa.....	13
2.3 El sistema Common Rail	17
2.3.1 Funcionamiento del sistema Common Rail.....	18
2.4 Estudio del flujo interno.....	22
2.4.1 Investigaciones sobre flujos no cavitantes.....	23
2.4.2 Investigaciones sobre flujos cavitantes.....	24
2.4.3 Modelado unidimensional de la cavitación.....	39
2.4.4 Modelado multi-dimensional del flujo cavitante.....	49
2.5 El proceso de atomización del chorro Diesel	60
2.5.1 Regímenes de atomización.....	60
2.5.2 Mecanismos de atomización de un chorro Diesel	62
2.5.3 Parámetros característicos de los chorros Diesel	64

2.6	Relación chorro-geometría	65
2.6.1	Modelos de simulación de chorros	72
2.7	Conclusiones sobre el estado actual del conocimiento	75
3	Técnicas experimentales y de cálculo	77
3.1	Introducción.....	77
3.2	Técnicas experimentales.....	82
3.2.1	Determinación de la geometría de toberas	82
3.2.2.	Maqueta para la caracterización hidráulica de toberas	90
3.2.3	Maqueta presurizada de inyección	101
3.2.4	Sistema de adquisición y procesado de imágenes	107
3.3	Técnicas de cálculo (CFD)	113
3.3.1	Ecuaciones de comportamiento del flujo	114
3.3.2	Modelos de turbulencia.....	115
3.3.3	Esquemas y algoritmo de cálculo	116
3.3.4	Simulación del fenómeno de cavitación	120
3.4	Parámetros definitorios del flujo interno en toberas	123
3.5	Toberas objeto del estudio.....	125
4	Resultados experimentales	129
4.1	Introducción.....	129
4.2	Determinación de la geometría de las toberas	131
4.2.1	Parámetros geométricos característicos	133
4.2.2	Hidro-erosión y coeficiente de reducción de área	137
4.3	Caracterización hidráulica de toberas	140
4.3.1	Influencia sobre el coeficiente de descarga	140
4.3.2	Influencia de la geometría sobre las condiciones críticas de cavitación	146
4.3.3	Influencia de la geometría y del fenómeno de cavitación.....	149
4.4	Influencia de la cavitación sobre el chorro Diesel.....	159

4.4.1	Visualización del chorro Diesel en maqueta.....	160
4.4.2	Influencia sobre los parámetros del chorro Diesel	162
4.4.3	Influencia de la cavitación sobre el proceso de preparación de la mezcla combustible-aire.....	172
5	Estudio computacional. Puesta a punto y validación	181
5.1	Introducción.....	181
5.2	Definición de la geometría objeto del estudio	183
5.3	Simplificación de la geometría: modelo axi-simétrico	187
5.3.1	Morfología de las mallas utilizadas	189
5.3.2	División de las mallas en zonas.....	190
5.3.3	Tratamiento de la zona próxima a la pared	193
5.3.4	Estructura de las mallas utilizadas	193
5.4	Estudios preliminares para la simulación del flujo en toberas	195
5.4.1	Estudio de independencia de malla	196
5.4.2	Tiempos de simulación característicos	200
5.5	Validación del cálculo en condiciones no cavitantes.....	202
5.5.1	Validación del modelo 3D y axi-simétrico	203
5.5.2	Diferencias entre el modelo 3D y el axi-simétrico.....	210
5.5.3	Influencia de la inclinación del orificio.....	213
5.6	Validación del modelo de cavitación	221
6	Influencia de la geometría y de los parámetros funcionales sobre el flujo interno	223
6.1	Introducción.....	223
6.2	Estudio del flujo interno en condiciones no cavitantes.....	226
6.2.1	Comparación de resultados a iso-diferencial de presión	229
6.2.2	Comparación del proceso de inyección a iso-diferencial de presión	239
6.2.3	Comparación de resultados a iso-masa inyectada	240
6.2.4	Comparación del proceso de inyección a iso-masa inyectada.....	247

6.3	Parámetros más influyentes en el inicio de la cavitación.....	247
6.3.1	Diseño de experimentos.....	250
6.3.2	Análisis de la varianza (análisis ANOVA)	252
6.4	Regresiones para el número de cavitación crítico	259
6.4.1	Validación de la regresión obtenida	263
6.4.2	Análisis de la regresión para el $KN_{crítico}$	264
6.4.3	Influencia de la longitud del orificio sobre el $KN_{crítico}$	270
6.4.4	Influencia de las propiedades físicas del combustible.....	271
6.5	Regresiones para el coeficiente de descarga	274
6.5.1	Análisis de la regresión obtenida para el C_d	276
7	Conclusiones y desarrollos futuros	283
7.1	Conclusiones.....	283
7.2	Desarrollos futuros.....	288
	Bibliografía	291

Lista de símbolos

Latinos

a	Velocidad del sonido
A_c	Área efectiva en la garganta del orificio
A_{celda}	Área de la cara de una celda en el cálculo CFD
A_{ef}	Área efectiva
$A_{\text{geométrica}}$	Sección geométrica de la tobera
A_i	Sección de entrada del orificio
A_o	Sección de salida del orificio
AR	Reducción de área
C_a	Coefficiente de contracción de área genérico
C_c	Coefficiente de contracción de área en la garganta del orificio
C_d	Coefficiente de descarga
CN	Número de cavitación
C_p	Calor específico a presión constante
C_v	Coefficiente de velocidad
d	Levantamiento de aguja
Dbhe	Diámetro del ensanchamiento a la entrada del orificio en una vista inferior
Dbi	Diámetro de entrada del orificio en una vista inferior
Dbm	Diámetro medio del orificio en una vista inferior
Dbo	Diámetro de salida del orificio en una vista inferior
D_{eq}	Diámetro equivalente
D_i	Diámetro de entrada al orificio
D_o	Diámetro de salida del orificio
Dshe	Diámetro del ensanchamiento a la entrada del orificio en una vista lateral
Dsi	Diámetro de entrada del orificio en una vista lateral
Dsm	Diámetro medio del orificio en una vista lateral

D_{so}	Diámetro de salida del orificio en una vista lateral
e	Longitud del asiento de la aguja de la tobera
HE	Nivel de hidro-erosión
h_v	Entalpía de vaporización
I_{mezcla}	Intensidad de mezcla del chorro
J_a	Número de Jacob
k	Factor de conicidad
k_t	Constante de conductividad térmica
K	Número de cavitación
KN	Número de cavitación (inversa de K)
l	Longitud del orificio
L_b	Longitud de la vena líquida del chorro
l_f	Longitud de la cara de una celda
L_{mezcla}	Longitud de mezcla del chorro
\dot{m}_a	Gasto másico de aire englobado por el chorro
\dot{M}	Flujo de cantidad de movimiento
\dot{M}_f	Flujo de cantidad de movimiento del líquido
\dot{m}_f	Gasto másico de líquido
\dot{m}_{vf}	Transferencia de masa entre la fase líquida y la fase vapor
M_i	Malla, tipologías empleadas
N	Número de burbujas por m^3 de volumen de fluido
P	Presión
P^*	Presión inicial en el algoritmo SIMPLE en el cálculo CFD
P'	Presión corregida en el algoritmo SIMPLE en el cálculo CFD
P_b	Presión de descarga
P_f	Presión de la fase líquida
P_i	Presión de inyección aguas arriba del orificio
P_{min}	Presión mínima en el dominio
$P_{raíl}$	Presión en el raíl
P_t	Presión de entrada a la tobera
P_{vap}	Presión de vapor del líquido
R	Radio de acuerdo medio a la entrada del orificio
r	Coordenada radial
R_a	Radio de acuerdo en la parte superior de entrada al orificio
R_b	Radio de acuerdo en la parte inferior de entrada al orificio
R_{burb}	Radio de la burbuja en el cálculo CFD
R_{burbo}	Radio inicial de la burbuja en el cálculo CFD
r_{ci}	Radio de cada uno de los cilindros (i) considerados para el cálculo del volumen del chorro

Re	Número de Reynolds
Re _t	Número de Reynolds teórico
S	Penetración del chorro libre e isotermo
t	Tiempo
T	Temperatura
t*	Escala de tiempo en la dinámica de la burbuja
t _c	Tiempo de colapso de la burbuja
t _{mezcla}	Tiempo de mezcla del chorro
U _{burb}	Velocidad de la pared de la burbuja
U _c	Velocidad en la garganta del orificio
U _{ef}	Velocidad eficaz
U _{eje}	Velocidad en el eje del chorro
u _i	Velocidad en la coordenada i en el cálculo CFD
u _i *	Velocidad en la coordenada i calculada a partir de P* en el cálculo CFD
u _i '	Velocidad en la coordenada i calculada a partir de P' en el cálculo CFD
U _o	Velocidad del fluido a la salida del orificio
U _{teórica}	Velocidad teórica del fluido a la salida del orificio
V	Volumen del chorro libre e isotermo
X	Variable escalar genérica en el cálculo CFD
X _f	Variable escalar genérica para la fase líquida en el cálculo CFD
X _v	Variable escalar genérica para la fase vapor en el cálculo CFD

Símbolos griegos

α	Ángulo de inclinación del orificio
α_f	Fracción volumétrica de la fase líquida en el cálculo CFD
α_t	Difusividad térmica
α_v	Fracción volumétrica de la fase vapor en el cálculo CFD
ΔP	Caída de presión a través del orificio, $\Delta P = (P_i - P_b)$
Δs	Distancia entre el centro de la celda y el centro de la cara en el cálculo CFD
θ	Ángulo del chorro libre e isotermo
Φ	Variable arbitraria utilizada en el cálculo CFD
Φ_c	Valor de la variable Φ en el centroide de la celda
Φ_f	Valor de la variable Φ en la cara de la celda
k- ϵ	Modelo de turbulencia
μ	Viscosidad en el cálculo CFD
μ_f	Viscosidad dinámica de la fase líquida

ρ	Densidad en el cálculo CFD
ρ_a	Densidad del aire
ρ_f	Densidad de la fase líquida
ρ_v	Densidad de la fase vapor
σ	Tensión superficial
ν_f	Viscosidad cinemática de la fase líquida
ψ	Ángulo entre el eje de la tobera y el eje del orificio

Subíndices de carácter general

adim	Variable adimensionalizada
crítico	Condición crítica
max	Valor máximo
min	Valor mínimo
orificio	Valor de la variable por orificio

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes y justificación

Una de las partes más críticas en los motores Diesel es la que concierne a las toberas de inyección, en concreto, a la morfología de los orificios de descarga del combustible en la cámara de combustión del motor. De la geometría de estos orificios dependen las características del flujo en el interior y a la salida de los mismos. Estas características son fundamentales para los fenómenos de atomización del chorro y preparación de la mezcla del combustible con el aire, requisito indispensable y de cuya calidad dependen el rendimiento de la combustión y la formación de contaminantes.

Es intuitivo que no es posible establecer una teoría predictiva del comportamiento del chorro Diesel en la cámara de combustión sin abordar, de alguna forma, el estudio de los efectos sobre el flujo interno derivados de la utilización de una tobera con unas características geométricas determinadas. Sin embargo, a pesar de la influencia que tiene la configuración de los orificios de descarga sobre los procesos de inyección y combustión, la física del flujo en el interior de estos orificios es actualmente muy poco conocida, o al menos, conocida de una manera difusa. Este conocimiento parcial está justificado por la enorme dificultad que supone el estudio de las características del flujo interno en el interior de las toberas, fundamentalmente debida a los siguientes factores:

- Las pequeñas dimensiones de los orificios de descarga del combustible. Éstos suelen tener longitudes características de en torno a un milímetro y diámetros que rondan la décima de milímetro.
- Alta velocidad del flujo en su interior. Debido a los fuertes gradientes de presión a los que están sometidas las toberas, con el fin de favorecer los fenómenos de atomización del chorro Diesel en pequeñas gotas, y los procesos de mezcla aire-combustible, la velocidad del flujo en el interior de los orificios puede llegar a varios cientos de metros por segundo.
- El flujo es de naturaleza transitoria, con una duración máxima del fenómeno de inyección del orden del milisegundo, tiempo durante el cual el flujo está influenciado de una manera muy importante por la dinámica de la aguja, sobre todo al principio y al final del proceso de inyección, y sometido a condiciones de temperatura y presión muy variables.

Estas características hacen que el estudio experimental del flujo desarrollado en el interior de los orificios de las toberas de inyección sea una tarea harto difícil, que repercute directamente en las estrategias de investigación en este campo. De hecho, los resultados experimentales de los investigadores sobre el tema se corresponden muchas veces con simplificaciones de las condiciones operativas reales, y por lo tanto, de conclusiones muchas veces contradictorias y dudosamente extrapolables a la realidad de los motores Diesel. Así, dentro del elenco de posibilidades, podemos encontrar en la literatura experimentaciones en condiciones de presión y temperatura estacionarias, frente a medidas más realistas realizadas sobre motor. También es posible encontrar estudios con geometrías de orificios simples frente a investigaciones donde se utilizan geometrías de toberas reales, o incluso, trabajos con modelos acrílicos de toberas a gran escala, que además de facilitar la experimentación permiten visualizar el flujo interno, frente a otros que utilizan tamaños de orificios a escala real, etc.

Al mismo tiempo, la dificultad del estudio se acentúa enormemente si consideramos que el flujo en el interior de dichos orificios puede ser bifásico debido al fenómeno de cavitación que ocurre bajo ciertas condiciones operativas en las que trabajan dichos orificios. Esto hace que la vía computacional para el estudio del flujo por medio del modelado tridimensional, sea también una tarea complicada, debido a la complejidad de la simulación de dicho fenómeno en estas condiciones tan críticas.

Las experiencias de algunos investigadores muestran que el fenómeno de cavitación en el interior de los orificios puede tener una gran influencia sobre los posteriores fenómenos de inyección y combustión. Sin embargo, el conocimiento de las condiciones que lo propician, su desarrollo y sobre todo,

su influencia sobre el flujo interno, y los sucesivos procesos de inyección y combustión, es escaso y en ciertas ocasiones confuso.

1.2 Sobre este libro

El presente estudio pretende ser una contribución a la mejora del conocimiento de la influencia de la geometría sobre el comportamiento del flujo en el interior de toberas de inyección Diesel y el posterior desarrollo del chorro. Gran parte del trabajo está enfocado claramente en el estudio del fenómeno de cavitación, a las condiciones operativas y geométricas que propician su iniciación y desarrollo, y a sus consecuencias sobre el flujo interno y sobre el comportamiento del chorro. Debido a la complejidad del fenómeno estudiado y a la dificultad experimental de su estudio y observación, no se pretende conseguir una descripción exhaustiva y un análisis cuantitativo del conjunto de los mecanismos físicos presentes, sino, más bien, aportar información relevante, que permitan avanzar un poco más en la comprensión del complejo proceso de inyección Diesel.

El trabajo global presenta dos partes complementarias y orientadas hacia un mismo objetivo global:

- Desde el punto de vista experimental, se estudian un conjunto de toberas facilitadas por un proveedor, las cuales han sido diseñadas siguiendo unos requerimientos geométricos, de modo que se permita aislar la influencia relativa de cada uno de los parámetros considerados sobre el flujo interno y el posterior desarrollo del chorro.
- Desde el punto de vista computacional, se pretende justificar el comportamiento observado experimentalmente, así como ampliar y profundizar en los aspectos más importantes del estudio.

Tanto en el marco experimental como en el marco computacional, el trabajo se ha efectuado persiguiendo una serie de objetivos encauzados a la consecución satisfactoria del propósito general de la investigación.

Dentro del marco experimental, encontramos los siguientes objetivos:

- Determinar de una manera lo más precisa posible la geometría interna de toberas de inyección Diesel, así como cuantificar los parámetros geométricos más importantes definitorios de la misma.
- Caracterizar el comportamiento hidráulico de las toberas, que conjuntamente con la metrología efectuada aporten información sobre las características del flujo interno.

- Determinar las condiciones críticas que conducen a la aparición del fenómeno de cavitación en las toberas.
- Estudiar la influencia de la geometría y la repercusión del fenómeno de cavitación sobre el comportamiento macroscópico del chorro, en condiciones sin evaporación, pero lo más próximas posible a las condiciones reinantes en la cámara de combustión del motor.

Por otra parte, dentro del marco computacional, los objetivos perseguidos son:

- La puesta a punto de una herramienta de cálculo computacional que permita realizar simulaciones del flujo interno en toberas, mediante la técnica de volúmenes finitos, con las máximas garantías.
- Tras la validación del cálculo, explotar su potencial para la exploración de las particularidades del flujo interno en diferentes geometrías, que permitan justificar el comportamiento observado experimentalmente en condiciones cavitantes y no cavitantes.
- Profundizar en la influencia de la geometría sobre el flujo, y sobre la tendencia de la tobera a cavitarse, con un control total en la variación de los parámetros geométricos que permita aislar la influencia de todos y cada uno de ellos. Al mismo tiempo estudiar la influencia de otros parámetros que no se han podido considerar en la parte experimental.

Con este ánimo, seguidamente se detalla el contenido de los diferentes capítulos, tratando de justificar cada uno de ellos a la luz de los objetivos y de la metodología que se acaba de mostrar.

Tras una breve introducción a los sistemas de inyección Diesel, y en particular, a los sistemas de inyección directa, en el **capítulo 2**, se realiza una extensa recopilación bibliográfica donde quedan reflejadas las más importantes investigaciones realizadas sobre el estudio del flujo en toberas a lo largo de los últimos años. Dentro del estudio del estado del arte, se presentan las aportaciones más notables referentes a la investigación del flujo interno, tanto desde el punto de vista experimental, como desde el punto de vista del modelado fluido-dinámico. Gran parte del estudio bibliográfico se centra en la influencia de la geometría y del fenómeno de cavitación sobre el comportamiento del flujo y posterior desarrollo del chorro. A la física de este fenómeno, y a su observación experimental, se dedica gran parte de esta recopilación. En efecto, éste fenómeno ha centrado el interés de los últimos estudios realizados sobre el flujo interno en toberas, a pesar de que otros fenómenos complejos, tales como la turbulencia, son considerados también importantes a la hora de estudiar el flujo, pudiendo estar éstos fuertemente ligados entre sí.

A continuación, se hace mención a los avances más importantes acaecidos en los últimos años en el campo del modelado computacional del flujo en toberas. De nuevo, al “*intento*” de la modelización de la cavitación se dedica gran parte de la recopilación, donde se exponen los logros obtenidos en este campo, así como la situación y perspectivas futuras. Como parte final de este capítulo, el estudio del estado del arte se hace extensivo a las investigaciones sobre el comportamiento de chorros Diesel, en concreto, al estudio de la conexión *geometría - características del chorro* que muchos investigadores experimentalistas han abordado desde un principio a lo largo de los últimos años con un conocimiento, a veces, más bien escaso de las características del flujo interno. Desde el punto de vista del modelado computacional, se realiza también en este caso, una recopilación de algunos de los modelos de simulación de chorros que tienen en cuenta parámetros geométricos y de flujo en el interior de los orificios.

Tras la recopilación bibliográfica, en el **capítulo 3** se presentan las técnicas puestas a disposición para la consecución de esta investigación. Entre ellas, se han utilizado algunas herramientas potenciales ya existentes en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, y además, se han creado nuevas instalaciones y desarrollado nuevas metodologías con el fin de realizar una caracterización y análisis de los fenómenos puestos en juego. Dentro de este capítulo, se describirán tanto las técnicas experimentales como las técnicas computacionales utilizadas.

Entre las primeras cabe citar:

- Una novedosa metodología para la determinación de la geometría de las toberas de inyección.
- La maqueta de caracterización hidráulica, que permite la determinación de la permeabilidad o coeficiente de descarga de las toberas bajo condiciones estacionarias.
- La maqueta presurizada de inyección, utilizada para la visualización y el análisis del comportamiento del chorro bajo condiciones similares a las operativas del motor.

En cuanto a las técnicas computacionales:

- Se describe el código de cálculo utilizado para la caracterización del flujo interno. Se realiza una breve descripción de los modelos de turbulencia y de los esquemas de cálculo, de cuya influencia sobre los resultados se realiza un estudio más detallado en el capítulo 5.

- Como parte importante del cálculo fluido-dinámico, se realiza una descripción del modelo de cavitación implementado en el código de cálculo que se utilizará para tratar de simular el flujo en condiciones cavitantes.
- Los parámetros adimensionales definitorios del flujo interno de una tobera y que nos permitirán evaluar el potencial de las mismas son presentados igualmente en este apartado.
- Por último, se realiza una descripción de las necesidades del conjunto de toberas objeto del estudio experimental. Estas toberas fueron demandadas a la empresa fabricante con una serie de requerimientos, de forma que sus parámetros geométricos más importantes se hiciesen variar independientemente, permitiendo aislar la influencia de cada uno de ellos, para la obtención de conclusiones lo más concisas posibles.

En el capítulo 4 se procede a la presentación de los resultados de la caracterización experimental de las toberas objeto del estudio. Los parámetros geométricos más relevantes de las diferentes toberas, así como los resultados de permeabilidad para diferentes condiciones estacionarias de presión y levantamiento de aguja máximo, son presentados. La aplicación a casos reales de la teoría uni-dimensional de la cavitación, nos permite detectar mediante una técnica no intrusiva las condiciones de presión para las cuales la cavitación aparece. Esta información se condensa en un parámetro adimensional llamado número de cavitación crítico. La combinación de los resultados de caracterización dimensional, junto a los resultados de caracterización hidráulica, y número de cavitación crítico, nos permiten establecer pues, una primera relación entre geometría, el comportamiento del flujo y las condiciones de inicio de la cavitación para el conjunto de toberas caracterizadas. Se identificarán así los parámetros geométricos que incitan a la cavitación y los que, por el contrario, la inhiben. La influencia de la geometría y de la cavitación sobre el coeficiente de descarga se analizará también en este apartado. Por último, la influencia de la cavitación sobre el comportamiento del chorro se trata en la parte final del capítulo, donde se estudia como afecta la aparición del fenómeno a las características macroscópicas del chorro, y extensivamente, al fenómeno de mezcla aire-combustible, del cual depende directamente la eficiencia del proceso de combustión.

El **capítulo 5** consiste en un estudio preliminar de puesta a punto y validación de la simulación computacional del flujo interno. En la primera parte del capítulo, tras la presentación del volumen de cálculo, se realiza un estudio de independencia de malla consistente en un análisis de sensibilidad del número y distribución de celdas sobre los resultados, en función del tratamiento de la turbulencia y los esquemas de cálculo utilizados. El objetivo del estudio es la determinación de la calidad del mallado óptimo que proporcione resulta-

dos precisos pero con el menor coste computacional posible. Una simplificación con simetría axial (axi-simétrica) de la geometría real se presenta. El objetivo de la utilización de este tipo de malla es reducir el tiempo computacional de las ejecuciones, pero al mismo tiempo respetando los parámetros geométricos de la tobera real. Los resultados obtenidos utilizando dos modelos de turbulencia y diferentes esquemas de cálculo son comparados con el cálculo laminar, estableciéndose como resultado del análisis el tipo de malla, distribución de las celdas, modelo de turbulencia y esquema de cálculo más adecuado para abordar un estudio de cálculo computacional en toberas de inyección con garantías. En la última parte del capítulo se realiza una validación del cálculo computacional desde dos puntos de vista diferentes: por una parte, la comparación del flujo másico de descarga para unas condiciones de presión, y por otra, la comparación de las condiciones de presión críticas de inicio de la cavitación. Esta validación se realiza tanto sobre modelos 3D, reproducción de la geometría real, como con la simplificación axi-simétrica de la misma. Las diferencias entre los resultados computacionales y experimentales quedan acotadas y justificadas.

Una vez el cálculo es validado, en el **capítulo 6**, se procede a la explotación del mismo. En la primera parte del capítulo se comparan las características del flujo interno en toberas de diferentes características geométricas.

Posteriormente se realiza un profundo estudio computacional de la influencia de los parámetros geométricos en la propensión de las toberas a cavitación, a través de la determinación de sus condiciones de cavitación críticas. Para ello, una vez seleccionados el elenco de parámetros geométricos y funcionales influyentes en el fenómeno, y recurriendo a una técnica de diseño de experimentos, se realiza una identificación de los parámetros más significativos a través de un análisis de varianza (Anova). Tras la identificación de dichos parámetros, se realiza un estudio de regresión del número de cavitación crítico en función de los parámetros geométricos para un número elevado de toberas. En este caso, las condiciones de cavitación críticas se determinan computacionalmente sobre toberas cuyas mallas han sido elaboradas previamente. El objetivo es la obtención de una expresión para el parámetro de cavitación crítico que nos permita poner de manifiesto, y sobre todo analizar, la influencia de los parámetros geométricos y funcionales de las toberas sobre la aparición del fenómeno. De forma análoga, se procede a la obtención de una regresión del coeficiente de descarga en función de los parámetros geométricos, que nos permite obtener relaciones importantes entre la morfología y este importante parámetro de flujo.

Por último, las conclusiones más relevantes desveladas a lo largo del estudio y las nuevas vías de investigación futuras serán mostradas en el **capí-**

tulo 7, donde quedan expuestos algunos trabajos futuros potencialmente importantes para la mejora del conocimiento en este interesante campo de la automoción.

Capítulo 2

Características fundamentales del proceso de inyección Diesel

2.1 Introducción

El contenido de este capítulo puede dividirse en tres partes bien diferenciadas: en primer lugar, se realiza una breve descripción de las tipologías de los sistemas de inyección existentes en la actualidad, entrando con un mayor nivel de detalle en el sistema de inyección *Common Rail*. Como parte más importante del sistema de inyección, se describe brevemente el funcionamiento del inyector. Posteriormente se realiza una importante recopilación bibliográfica donde quedan reflejadas las aportaciones más notables en el campo de la investigación del flujo interno en toberas de inyección, tanto desde el punto de vista experimental como del punto de vista del modelado. Esta recopilación se centra principalmente en las investigaciones sobre la influencia de la geometría y del fenómeno de cavitación sobre el flujo. En la parte final, el estudio del estado del arte se extiende a las investigaciones sobre el comportamiento del chorro Diesel, con especial atención en aquellas que tratan de arrojar luz en la relación geometría-comportamiento del chorro. Dentro de esta parte se dedican unas páginas a la recopilación de algunos de los modelos de simulación de chorros que tienen en cuenta parámetros geométricos y de flujo del interior de los orificios.

2.2 Sistemas de inyección Diesel

El sistema de inyección es el responsable de que se consigan los requerimientos de entrega de combustible del motor Diesel. Para ello, tiene que cumplir las siguientes funciones básicas:

- Introducir el combustible en el interior de la cámara de combustión según una ley – denominada *tasa de inyección* – que va a definir el comportamiento de las diferentes fases de la combustión en sincronismo con el movimiento del pistón.
- Atomizar el combustible para aumentar la superficie en contacto con el aire caliente, tras la etapa de compresión, y acelerar la evaporación.
- Mezclar el combustible con el aire disponible en la cámara de combustión.

Según el rango de presiones de trabajo, se distinguen dos partes en un sistema de inyección: *baja presión* (desde presión atmosférica hasta una presión del orden de 3 bares) y *alta presión* (desde 100 hasta 1800 bares, e incluso más, dependiendo del sistema considerado).

Los componentes del *circuito de baja presión* comprenden: el *depósito* y los *filtros de combustible* (destinados a retener las sustancias sólidas contenidas en el combustible que podrían dañar los diferentes elementos mecánicos), la *bomba de cebado o alimentación* (que asegura una presión a la entrada de la de alta presión entre 2 y 3 bares), el *regulador de presión* (que limita la presión de salida de la bomba de cebado) y las *líneas de baja presión*.

La presión del combustible, requerida para la inyección, es generada en el *circuito de alta presión* del sistema. Dicha generación depende del tipo de sistema de que se trate.

Dependiendo del modo en que se produce la inyección de combustible, los sistemas de inyección pueden ser de *inyección indirecta* o de *inyección directa*.

En un motor equipado con un sistema de *inyección indirecta*, la cámara de combustión aparece dividida en dos partes: la precámara de inyección y la cámara de combustión propiamente dicha. En estos motores, durante la carrera de compresión, el aire se introduce en la precámara, generándose turbulencia a su paso a través del orificio de comunicación entre el espacio muerto (o cámara de combustión) y la precámara. El inyector, equipado con una tobera mono-orificio (de diámetro en torno a 1 mm), inyecta el chorro de gasoil en la precámara de inyección. La elevada turbulencia del aire ayuda a que las partí-

culas de gasoil del chorro se dispersen formando la mezcla aire-combustible. Debido a esta turbulencia, el inyector no requiere la complicación de los de inyección directa, en los que recae la función de atomizar el combustible, para favorecer la mezcla aire-combustible. La calidad del chorro no es tan importante como en la inyección directa, y las presiones de inyección son menores (entre 200 y 400 bares). El proceso de mezcla es acelerado, en gran medida, por las primeras fases del propio proceso de combustión. En la práctica, la combustión es incompleta en la precámara, pero las altas presiones que en ella existen proyectan el combustible sin quemar, junto con los primeros productos de la combustión, hacia el volumen muerto, creando, de esta forma, una rápida mezcla con el aire contenido en ella.

Los motores grandes y medianos, que no poseen un elevado régimen de giro, han sido equipados tradicionalmente con sistemas de *inyección directa*. Estos motores poseen un mejor rendimiento que los de inyección indirecta, por ello, la tendencia actual es extender el uso de los sistemas de inyección directa a los motores pequeños y rápidos.

En este tipo de motores, la inyección de combustible se realiza directamente en la cámara de combustión del motor, por lo que se prescinde de la cámara dividida. La cámara de combustión está labrada en el mismo pistón, y no en la culata, como ocurría en la inyección indirecta. Al no existir precámara de inyección, desaparecen las elevadas turbulencias que se generan en ésta, que eran las que ayudaban a la dispersión del chorro de combustible. Por lo tanto, en la inyección directa, la calidad del chorro tiene un papel muy importante, ya que no cuenta con la ayuda del medio para la producción de la mezcla aire-combustible.

Varias son las soluciones que se adoptan para ayudar a homogeneizar la mezcla aire-combustible en un motor de inyección directa:

- Las diferentes formas que adopta el conducto de admisión y la cámara de combustión sobre el pistón, permiten que el aire de la admisión forme en ella un vórtice denominado *swirl*, que favorece la dispersión del gasoil en la cámara de combustión.
- Al ser necesaria una buena calidad del chorro, los inyectores son más complejos que los de inyección indirecta. Están equipados con toberas de varios orificios, cuyos diámetros son pequeños (entre 0.12 y 0.25 mm). También son más robustos ya que las presiones de trabajo son mayores, hasta 1800 bares en los sistemas de última generación.

El menor consumo y el mayor rendimiento de la inyección directa han propiciado el continuo incremento en la investigación con estos motores, y la

extensión del campo de aplicación de los mismos a los motores rápidos. Las consecuencias sobre el sistema de inyección son:

1. Continua *elevación de la presión de inyección*. Algunos motores de serie para automoción alcanzan ya los 1800 bares.
2. *Aumento del número de orificios* de las toberas del inyector, así como *disminución del diámetro* de los mismos, con el objeto de producir una más homogénea atomización del chorro.
3. *Empleo de inyecciones múltiples*. Así, por ejemplo, la utilización de inyecciones piloto, consistentes en inyectar durante la última parte de la carrera de compresión una pequeña cantidad de combustible que eleve la presión y temperatura en la cámara de combustión, aceleran la posterior combustión principal y contribuyen a la reducción del ruido característico en este tipo de motores.

La investigación de los sistemas de inyección directa se justifica en base a las continuas modificaciones para extender su uso dentro de las normativas y requerimientos exigidos. Por otra parte, la penetración de este tipo de motores en el mercado está avalada por las cifras. Mientras que, en 1993, el número de vehículos ligeros, en Europa, equipados con estos motores era casi el 20%, hoy en día, representan el 90% de los motores Diesel vendidos como se muestra figura 2.1 sobre las ventas de vehículos Diesel en Europa Occidental. En esta figura, para los motores de inyección directa se especifican las tres variantes existentes y que se describen brevemente en el apartado 2.2.1.

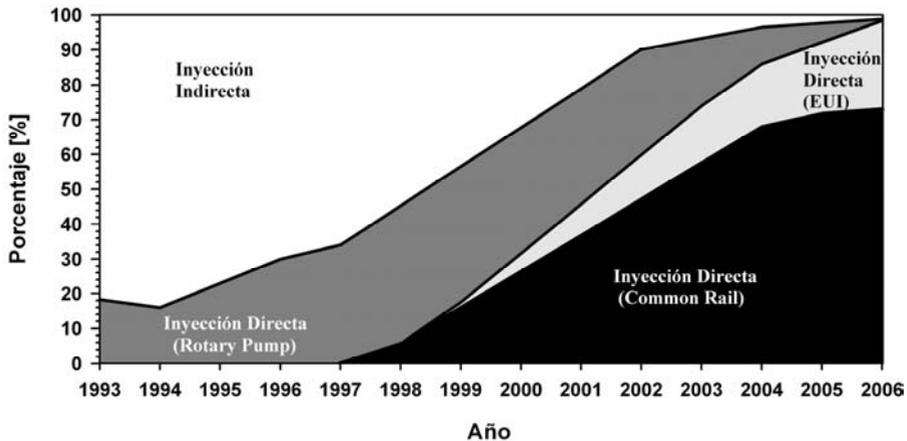


Figura 2.1. Ventas de motores Diesel de inyección indirecta e inyección directa en los últimos años y previsión para los próximos años.

2.2.1 Tipos de sistemas de inyección directa

Básicamente se distinguen dos grupos: sistemas de acción directa y sistemas de acumulación.

Pertenece a los *sistemas de acción directa* (*Rotary Pump* en la figura 2.1) todo sistema en el que la bomba de alta presión está encargada de dosificar el combustible que se requiere introducir en la cámara de combustión, mientras que la misión del inyector consiste en atomizarlo. En estos sistemas, la bomba de alta presión suministra el combustible al inyector a través de conductos (líneas de inyección), a una presión que depende del régimen de giro de la bomba, y que no es constante a lo largo de la inyección. El inicio de la inyección se gobierna mediante la propia presión del combustible, que ejerce una fuerza sobre el asiento de la aguja del inyector, venciendo así la acción de un muelle situado en el inyector (fuerza de pretensión).

Los *principales inconvenientes* de estos sistemas de inyección son:

- El propio funcionamiento de la bomba, que no permite mantener una presión constante a lo largo del proceso de inyección, cambiando, además, con el punto de funcionamiento del motor. Esto determina que la presión generada dependa del régimen de giro de la bomba.
- Como consecuencia de lo anterior, el punto de inicio de la inyección también se ve modificado por las condiciones de funcionamiento del motor, lo que obliga a equipar las bombas con elementos para poder calarlo respecto de una posición determinada del pistón.

Como se observa en la figura 2.1 este tipo de sistemas son los primeros utilizados en motores de inyección directa, pero su utilización es cada vez menor, siendo desplazados en los últimos años por los sistemas common rail y unit inyector (EUI) que se describen a continuación.

Entre los sistemas de acumulación se encuentran los sistemas de inyección en los que el inyector se encarga de la dosificación del combustible, además de su atomización. La bomba de alta presión tiene, como única función, la de aumentar la presión del combustible y mantenerla constante una vez alcanzada la de consigna. La apertura del inyector puede estar gobernada mecánica o electrónicamente. En los sistemas mecánicos, la entrega de combustible disminuye con el aumento del régimen de giro. Esto lleva a que estos sistemas se empleen, fundamentalmente, en motores destinados a trabajar a régimen de giro constante (motores estacionarios).

Los sistemas en los que la apertura del inyector se gobierna electrónicamente existen, teóricamente, desde hace años (Lauvin *et al.* [1991]). Sin embargo, hasta 1995, no se han producido sistemas de mando electrónicos con suficiente fiabilidad, y coste razonable, como para poder ser aplicados en los motores de automoción. Actualmente, varias empresas han desarrollado este tipo de sistemas que se conocen como common rail (raíl común), tanto para turismos (Guerrasi y Dupraz [1998], Stumpp y Ricco [1996], Su *et al.* [1997]), como para vehículos industriales (Boehner y Hummel [1997]).

Los sistemas equipados con common rail tienen las siguientes ventajas frente a los tradicionales:

- Control del punto de inicio y de la duración de la inyección.
- Alta precisión en la cantidad de combustible inyectada.
- Presión de inyección independiente del régimen del motor.
- Presión de inyección prácticamente constante a lo largo de la inyección.
- Posibilidad de descomponer la inyección en dos o más etapas (inyección piloto o múltiple) con el fin de disminuir la combustión premezclada, para controlar las emisiones de óxidos de nitrógeno y el ruido de la combustión, en el caso de la inyección piloto; o de que sirva como agente reductor de NO_x, (Stumpp y Ricco [1996]) o para la regeneración de los filtros de partículas (que consiste en quemar periódicamente las partículas acumuladas en el filtro), en el caso de la post-inyección.

Otra característica importante es la elevada presión de inyección (hasta 160 MPa para el de la casa Delphi Diesel Systems (Guerrasi y Dupraz [1998]). Ganser (Ganser [2000]) presenta unos inyectores capaces de trabajar a más de 200 MPa), lo que permite mejorar la calidad de la atomización y disminuir así las emisiones de humos y partículas, según comprueban experimentalmente Kato *et al.* [1998], Lauvin *et al.* [1991], Yamaki *et al.* [1994] y Badami *et al.* [1999].

Como se observa en la figura 2.1, la utilización de los sistemas common rail, ha experimentado un fuerte crecimiento desde 1998, siendo en la actualidad el tipo de sistema más extendido en este tipo de motores ocupando aproximadamente el 60% de la producción.

Además de los dos grupos principales comentados anteriormente existe un tercer tipo llamado *sistema inyector-bomba*.

El *sistema inyector-bomba* (*unit injector*) se fija directamente en la culata del motor (figura 2.2). Este diseño combina la bomba de inyección y la

tobera de inyección en una única unidad que es accionada por el árbol de levas del motor; bien directamente, o a través de seguidores y articulaciones, según señalan Kniefel y Sobieszczanski [1997]. Cada inyector-bomba tiene su propia válvula solenoide de alta velocidad, que controla el inicio y el final de la inyección.

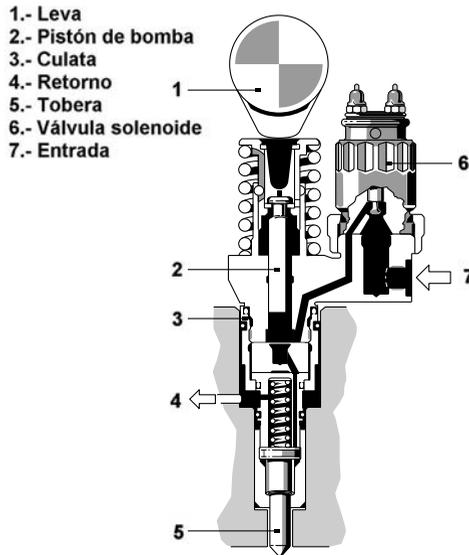


Figura 2.2. Sistema inyector-bomba.

Cuando la válvula solenoide está abierta, el inyector-bomba fuerza el combustible hacia el retorno, al tiempo que se llena la cámara de bombeo durante la carrera de admisión del pistón y, cuando está cerrada, el combustible es forzado hacia el cilindro del motor, cuando se supera la presión de tarado del inyector, mientras que se permite un cierto flujo de retorno durante la carrera de entrega del pistón. El inicio de la inyección está definido por el punto de cierre de la válvula solenoide, y la cantidad de combustible inyectada, a su vez, por el *tiempo de cierre* (tiempo durante el que la válvula solenoide permanece cerrada). La válvula solenoide es accionada por una ECU (Unidad de Control Electrónico), en base a los datos de su mapa interno. Esto implica que el inicio y el final de la inyección son programables y, por lo tanto, independientes de la posición del pistón en el cilindro del motor.

En los sistemas de inyección convencionales, bomba-línea-inyector, la presión máxima de inyección está limitada por las características físicas de las líneas de alta presión entre la bomba y el inyector. El inyector-bomba hace que tales líneas sean superfluas, lo que significa que son posibles presiones de

inyección de hasta 160 MPa. Presiones de esta magnitud, junto con el control, en base a un mapa, del inicio y duración de la inyección (o cantidad de combustible inyectado), conduce a una reducción considerable de las emisiones contaminantes del motor Diesel. Mediante el uso del control electrónico, funciones especiales como el inicio de inyección con control de temperatura, control del motor en marcha suave, e incluso, inyección piloto para reducir el nivel de ruido, son posibles. Además, el uso del inyector-bomba hace posible desconectar individualmente los cilindros del motor, durante el funcionamiento a carga parcial.

El sistema hasta aquí descrito se denomina *unit injector* en la literatura anglosajona, por ejemplo en Knefel y Sobieszczanski [1997]. A continuación, se describe una variante del sistema inyector-bomba, que se denomina *unit pump*.

El sistema *unit pump* es un sistema de inyección modular de alta presión. Desde el punto de vista del control, está estrechamente relacionado con el sistema *unit injector*, y alcanza presiones de inyección de igual magnitud. Ambos sistemas emplean una bomba de inyección para cada cilindro del motor, que es accionada por el árbol de levas. El uso de una válvula solenoide de alta velocidad, accionada electrónicamente, permite que tanto el inicio de la inyección como la cantidad de combustible inyectada sean ajustados con precisión para cada cilindro. Esto permite la entrega de combustible a la tobera de inyección, la interrupción de dicha entrega y el retorno del exceso de combustible hacia el depósito. Análogamente al sistema *unit injector*, el sistema *unit pump* registra los parámetros más importantes del motor y los traduce en un óptimo inicio de la inyección y en una óptima cantidad de combustible inyectada para unas condiciones de funcionamiento dadas. El sistema comprende los siguientes módulos (ver figura 2.3):

- La bomba de alta presión con la válvula solenoide acoplada.
- La línea corta de entrega de alta presión.
- El inyector.

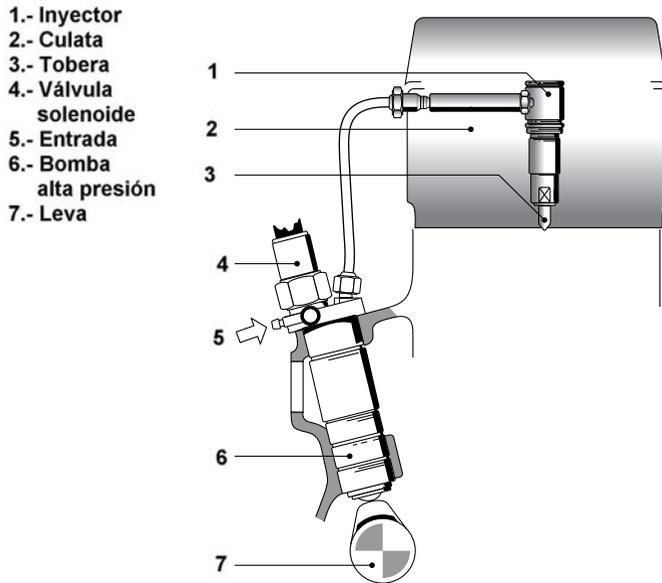


Figura 2.3. Sistema unit pump.

Con este diseño modular, comparado con el diseño compacto del sistema *unit injector*, este sistema representa un sistema de inyección de alta presión directamente controlado que es adecuado para un amplio rango de requerimientos de instalación diferentes.

Knefel y Sobieszczanski [1997] comprueban que el sistema inyector-bomba (del tipo *unit injector*) es más eficiente que el sistema convencional bomba-línea-inyector equivalente debido a que requiere menos potencia del motor. Por último, destacar que el uso de este tipo de sistemas está menos extendido que el sistema common-rail, siendo actualmente de alrededor del 10%, pero su utilización se espera que aumente considerablemente en los próximos años (figura 2.1).

2.3 El sistema Common Rail

Como se ha dicho anteriormente este sistema forma parte de los sistemas de acumulación en los que la apertura del inyector está gobernada electrónicamente. Actualmente existen dos variantes atendiendo a la naturaleza de la electro-válvula encargada del pilotaje hidráulico del inyector, existiendo los sistemas comandados por electro-válvula de tipo solenoide y los que apro-

vechan las propiedades piezoeléctricas de ciertos materiales para el comando del mismo.

2.3.1 Funcionamiento del sistema Common Rail

En la figura 2.4 se muestra un esquema genérico de un sistema common-rail. Una bomba de alimentación aspira combustible del depósito y lo lleva a una bomba de alta presión. Esta bomba de alta presión está accionada por el motor y suministra el combustible a través de un depósito común (common rail) a los inyectores de los cilindros del motor. Parte de este combustible es inyectado en la cámara de combustión del motor, y otra parte, más pequeña, permite el pilotaje hidráulico que controla el movimiento de las agujas de los inyectores y luego es devuelta al depósito.

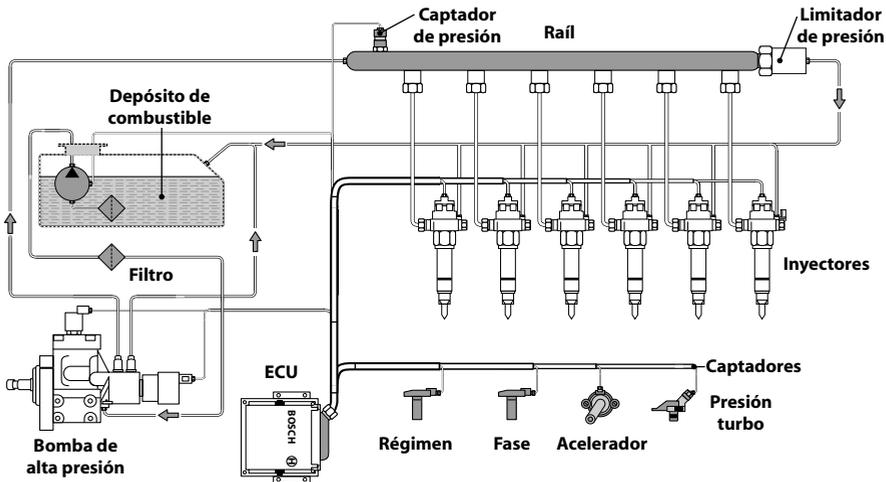


Figura 2.4. Esquema de un sistema common rail genérico (Fuente: Bosch).

El volumen de combustible entre la bomba de alta presión y los inyectores sirve como acumulador. Éste permite la amortiguación de las oscilaciones provocadas por el funcionamiento pulsante de la bomba de alta presión y, especialmente, por la brusca salida de combustible a través de los inyectores. Estas oscilaciones son del orden de pocas decenas de bares (Stump y Ricco [1996], Payri *et al.* [2004b, 2005b]).

Un sensor de presión mide la presión del combustible en el raíl. Esta señal se compara con el valor de consigna grabado en la ECU (Unidad Electrónica de Control). Si el valor medido y de consigna son distintos, un orificio de descarga situado en el regulador de presión, en el lado de alta presión, se

abre o se cierra para igualar ambos valores. El caudal excedente de combustible retorna al depósito. Existen limitadores de flujo (válvulas mecánicas) en el raíl, uno por cada inyector, que cortan el suministro de combustible a los inyectores en el caso de que se detecten fugas o una inyección continua.

Los inyectores se abren y cierran controlados por la ECU en instantes definidos. La duración de la inyección, la presión de combustible en el raíl, y la permeabilidad (área y coeficiente de descarga) de los orificios de la tobera determinan la cantidad de combustible inyectada.

La bomba de alta presión es una bomba radial de pistones, para el caso de un motor rápido; para vehículos industriales, se emplean bombas en línea especiales. En ésta, una leva en el eje de accionamiento desplaza, sucesivamente, tres pistones. Los pistones son empujados contra la leva mediante muelles, y cada pistón aspira combustible a través de la correspondiente válvula de aspiración. El combustible aspirado es comprimido por el pistón cuando éste es accionado por la leva, y enviado hacia el raíl a través de una válvula de control. La pequeña excentricidad de la leva y la disposición simétrica de los pistones contribuyen a crear pequeñas oscilaciones de presión en el raíl. La válvula de aspiración de cada pistón puede ser regulada por una electro-válvula. De este modo, puede adaptarse la cantidad de combustible enviada por la bomba de alta presión a la cantidad demanda real por el motor. Esto conlleva un bajo consumo de potencia por parte del sistema de inyección, así como a mantener más baja la temperatura del combustible. La bomba de alta presión tiene una válvula de seguridad situada a la entrada de combustible. El pistón de dicha válvula cierra la entrada de combustible a la bomba de alta presión cuando la presión del combustible es baja. Cuando la presión aumenta, la válvula de seguridad se abre. Por medio de esta válvula, se puede cortar el flujo de combustible al motor cuando la bomba de alta presión esté desactivada.

Sin duda la parte más compleja e importante de este tipo de sistemas es el inyector. En la figura 2.5, se muestra un esquema de un inyector genérico de un sistema common rail.