



TEMAS AVANZADOS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

F. Payri/J.M^a. Desantes

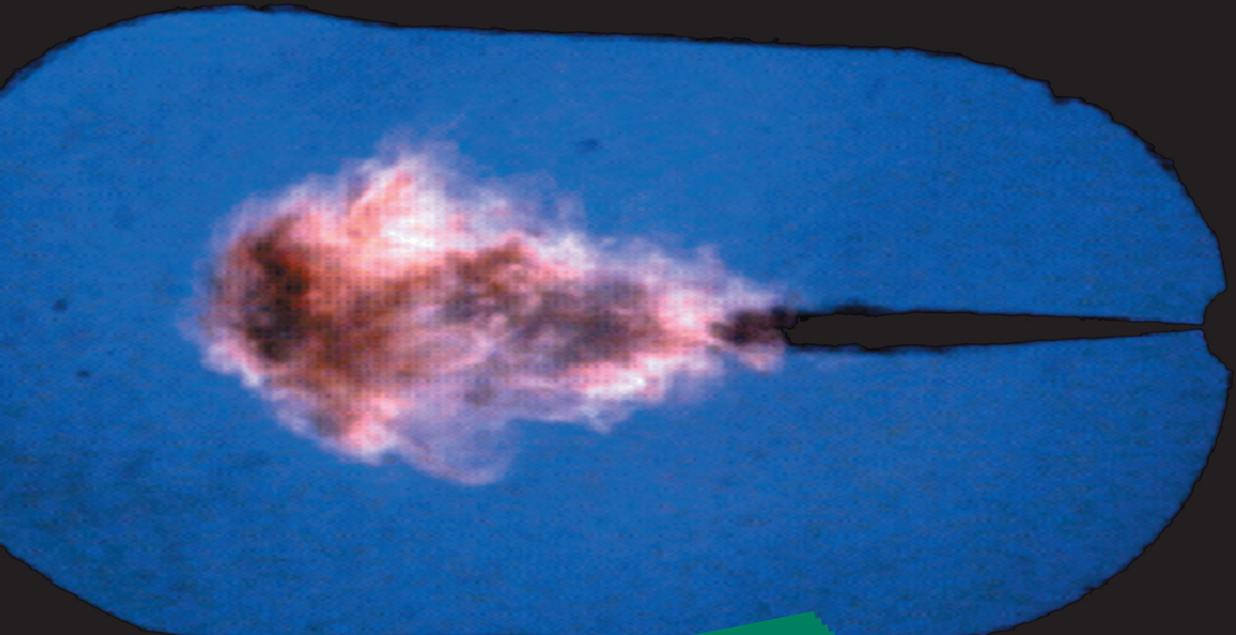
EL PROCESO DE COMBUSTIÓN TURBULENTA DE CHORROS DIESEL DE INYECCIÓN DIRECTA

CMT
motores térmicos



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

José M^a García Oliver



EDITORIAL REVERTÉ

TEMAS AVANZADOS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

F. Payri/J.M^a. Desantes

EL PROCESO DE COMBUSTIÓN TURBULENTA DE CHORROS DIESEL DE INYECCIÓN DIRECTA

José M^a García Oliver

Dr. Ingeniero Industrial

**Profesor Titular de Escuela Universitaria
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

**El proceso de combustión turbulenta
de chorros Diesel de inyección directa**

Copyright © José María García Oliver

Edición en papel:

© Editorial Reverté. S.A., 2006

ISBN: 978-84-291-4709-4

Edición en e-book:

© Editorial Reverté. S.A., 2020

ISBN: 978-84-291-9093-9

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.

Prefacio

Nos complace presentar esta monografía, fruto de la actividad del grupo CMT–Motores Térmicos en el estudio de la combustión del chorro Diesel en motores de inyección directa. El trabajo plantea una descripción conceptual del chorro Diesel inerte y de la llama de difusión, apoyándose para ello en razonamientos de chorro gaseoso, así como en resultados de cálculos numérico y de ensayos experimentales mediante técnicas ópticas. El punto de vista elegido se centra en los fenómenos de carácter básico, en la comprensión de la física de la combustión del chorro, pero intentando no perder la perspectiva de la utilidad de los conceptos desarrollados para el análisis del comportamiento del motor.

El trabajo ha permitido describir mediante leyes cuantificables los fenómenos de evaporación del combustible, así como los asociados a la reacción química, como son el aumento de temperatura y el cambio de composición que ocurren en la llama. La metodología empleada, que combina una gran cantidad de fuentes diferentes de información, así como el propio desarrollo argumental del trabajo han contribuido a mejorar de manera notable el conocimiento disponible sobre el fenómeno de la combustión del chorro Diesel, y en general de los procesos de combustión por difusión.

Finalmente quisiéramos hacer una breve reseña del autor de este trabajo, que en la actualidad imparte docencia como Profesor Titular de Escuela Universitaria, y desarrolla su actividad investigadora como miembro de la línea de Técnicas Ópticas aplicadas a la Combustión en el grupo CMT–Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia. Su labor investigadora está centrada en el estudio del proceso de combustión Diesel de inyección directa, campo en el que posee diversas publicaciones en revistas y congresos internacionales.

José M. Desantes
Catedrático de Universidad

José V. Pastor
Profesor Titular de Universidad

CMT – Motores Térmicos
Universidad Politécnica de Valencia

Índice General

1	Introducción	1
1.1	Contexto general	1
1.2	La investigación del proceso de combustión en motores Diesel .	3
1.3	Marco de trabajo	4
1.4	Sobre este libro	6
	Bibliografía	8
2	Fenomenología de la combustión Diesel DI	11
2.1	Introducción	11
2.2	Fases del proceso	12
2.3	Formación de la mezcla aire-combustible en un chorro Diesel .	15
2.3.1	Atomización	15
2.3.2	Evaporación	17
2.4	El autoencendido del chorro Diesel	19
2.5	La llama Diesel de difusión	30
2.5.1	Lift-off	34
2.6	Síntesis de la combustión Diesel	39
2.7	Conclusiones	43
	Bibliografía	44

3	Herramientas de análisis	51
3.1	Introducción	51
3.2	Cálculos numéricos	53
3.2.1	Metodología	53
3.2.2	Condiciones analizadas	60
3.3	Instalaciones experimentales	61
3.3.1	Motor maqueta	61
3.3.2	Motor monocilíndrico con accesos endoscópicos	64
3.4	Técnicas ópticas	67
3.4.1	Iluminación trasera difusa	68
3.4.2	Método de los dos colores	72
3.4.3	Visualización de la quimioluminiscencia del radical OH	87
3.4.4	Visualización endoscópica	92
3.5	Conclusiones	96
	Bibliografía	96
4	Análisis del chorro gaseoso turbulento en ambiente inerte	101
4.1	Introducción	101
4.2	Hipótesis generales	102
4.3	Chorro inerte isodenso	105
4.3.1	Planteamiento	105
4.3.2	Solución para la velocidad axial	109
4.3.3	Solución para la velocidad radial	113
4.3.4	Solución para la fracción másica de combustible	115
4.3.5	Iso-superficies	116
4.3.6	Trayectorias dentro del chorro	117
4.3.7	Englobamiento	122
4.3.8	Conclusiones	124
4.4	Mezcla no isodensa	125

4.4.1	Planteamiento	125
4.4.2	Campo de velocidades	129
4.4.3	Soluciones para la masa de combustible y la energía . . .	132
4.4.4	Relaciones de estado	134
4.4.5	Englobamiento	137
4.4.6	Escalado en la zona inicial del chorro	138
4.4.7	Conclusiones	141
4.A	Apéndice: Particularización de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento al eje del chorro	143
4.B	Apéndice: Particularización de la ecuación de conservación de la especie combustible al eje del chorro	145
4.C	Apéndice: Cálculo de los tiempos característicos de mezcla . . .	147
4.D	Apéndice: Cálculo de la función de englobamiento del chorro isodenso	149
	Bibliografía	149
5	Análisis del chorro gaseoso turbulento en ambiente reactivo	153
5.1	Introducción	153
5.2	Reacción atérmica	154
5.2.1	Planteamiento	154
5.2.2	El concepto de fracción de mezcla	156
5.2.3	Solución para la velocidad y las especies	160
5.2.4	Conclusiones	164
5.3	Reacción exotérmica	164
5.3.1	Planteamiento	164
5.3.2	La fracción de mezcla y las relaciones de estado	170
5.3.3	Distribución axial de propiedades	173
5.3.4	Distribución radial	190
5.3.5	Levantamiento de llama	193
5.3.6	Conclusiones	195
	Bibliografía	197

6	Análisis del proceso de evaporación del chorro Diesel inerte	199
6.1	Introducción	199
6.2	Estructura del chorro Diesel evaporativo	201
6.3	Cálculo de las propiedades locales	202
6.3.1	Hipótesis	203
6.3.2	Relaciones de estado	205
6.4	Distribución espacial de propiedades	210
6.5	Ley de escalado para la longitud líquida máxima	213
6.6	Contrastación experimental	216
6.6.1	Resultados del motor maqueta	217
6.6.2	Resultados del motor con accesos endoscópicos	229
6.7	Conclusiones	238
6.A	Apéndice: Deducción de la relación entre la proporción de masa evaporada y el incremento de entalpía en un chorro evaporativo	240
6.B	Apéndice: Ecuaciones de propiedades de equilibrio líquido-vapor	241
	Bibliografía	242
7	Análisis de la llama de difusión Diesel	245
7.1	Introducción	245
7.2	Consideraciones previas	246
7.2.1	La fracción de mezcla y las relaciones de estado	247
7.2.2	Distribución espacial de propiedades	253
7.3	Interpretación de los resultados del método de los dos colores .	255
7.4	Estudio experimental de la llama Diesel de difusión	264
7.4.1	Planteamiento del estudio	265
7.4.2	Análisis experimental del fenómeno de lift-off	270
7.4.3	Análisis experimental de la llama de hollín	278
7.5	Conclusiones	293
	Bibliografía	295

8 Conclusiones y trabajos futuros	297
8.1 Conclusiones	297
8.2 Trabajos futuros y reflexiones finales	300
Bibliografía	303

Tabla de símbolos

Latinos

a, b, c, d	Constantes de ajuste experimental
c_1, c_2	Constantes de Planck para la radiancia espectral de un cuerpo negro
C_λ	Constante $C_\lambda = \exp\left(-\frac{k_{soot}\Delta\tau}{\lambda^\alpha}\right)$
d_n	Diámetro nominal de orificio
d_o	Diámetro real de orificio
D_t	Difusividad másica turbulenta
f	Fracción de mezcla
F	Dosado (proporción másica combustible–aire)
F_{O_2}	Proporción másica estequiométrica combustible–oxígeno
F_r	Dosado relativo
g	Flujo difusivo turbulento por unidad de área y tiempo de una propiedad genérica q
h	Entalpía sensible
h^*	Entalpía absoluta (suma de la entalpía de formación y la sensible)
h_{form}^o	Entalpía de formación a la temperatura de referencia T_o
$\bar{H}_{p,f}$	Calor de reacción del combustible por unidad de masa
I	Radiancia espectral (intensidad de radiación por unidad de superficie, ángulo sólido y longitud de onda)
i, j	Coordenada horizontal (i) y vertical (j) del píxel de una imagen
K_{ext}	Coefficiente óptico de extinción del hollín
k_{eng}	Constante de englobamiento definida en una sección del chorro
k_n	Constantes de las distribuciones espaciales de las propiedades del chorro mediante expresiones analíticas ($n = 1, 2, 3, 4$)

k_{soot}	Variable óptica proporcional a la fracción volumétrica de hollín
KL	Factor de cantidad de hollín empleado en el método de los dos colores
L	Camino óptico recorrido por la radiación Espesor de llama
Le	Número de Lewis efectivo
m	Masa
\dot{m}	Gasto másico
ND	Nivel digital de una imagen
P	Presión
PM	Peso molecular
PN	Perfil normalizado
Pr	Número de Prandtl efectivo
q	Propiedad conservativa genérica
r	Coordenada radial del chorro
R	Constante universal de los gases perfectos
R_{ζ}	Radio de chorro definido en un cierto porcentaje ζ del perfil normalizado
Re	Número de Reynolds
s	Penetración de chorro transitorio
s_L	Velocidad de combustión premezclada laminar
Sc	Número de Schmidt efectivo
T	Temperatura
T_a	Temperatura aparente
t	Tiempo
u	Componente axial del vector velocidad
v	Componente radial del vector velocidad
v_{dif}	Velocidad de difusión radial
V_{soot}	Fracción volumétrica de hollín
w	Variable del algoritmo de resolución en el método de los dos colores
x	Coordenada axial del chorro
Y	Fracción másica
z	Coefficiente de compresibilidad

Griegos

α	Absortividad óptica Constante de ajuste empírico en la expresión de la emisividad de la llama de hollín (capítulo 3)
α_t	Difusividad turbulenta de energía
β_{umbral}	Porcentaje para la definición del umbral en una imagen
Δ	Incremento
ε	Emisividad
γ_t	Difusividad turbulenta de una propiedad conservativa q
λ	Longitud de onda
λ_t	Difusividad térmica turbulenta
μ_t	Viscosidad dinámica turbulenta
ν_t	Viscosidad cinemática turbulenta
θ	Ángulo del chorro
ρ	Densidad
ρ^*	Densidad parcial de un componente en una mezcla
σ	Desviación estándar
τ	Tiempo característico Flujo difusivo turbulento de cantidad de movimiento
τ_f	Tiempo característico de mezcla del combustible hasta una fracción de mezcla f
$\dot{\omega}$	Tasa de formación/destrucción local de una especie

Subíndices y superíndices

-	Promedio en una sección del chorro
a	Aire
a, ∞	Aire o gas ambiente puros
cl	Referido al eje del chorro (<i>central line</i>)
cn	Referido al cuerpo negro
$comb$	En combustión
$delay$	Referido al tiempo de retraso al autoencendido

<i>dil</i>	Referido a la especie diluyente
<i>eq</i>	Equivalente
<i>evap</i>	Referido a la evaporación
<i>f</i>	Referido al combustible
<i>f, evap</i>	Condiciones de evaporación total del combustible
<i>f, l</i>	Combustible líquido
<i>f, v</i>	Combustible vapor
<i>fondo</i>	Referido al nivel digital de fondo de una imagen
<i>int</i>	Condiciones del aire de admisión al motor
<i>iny</i>	Inyección
<i>max</i>	Máximo
<i>mix</i>	Referido a condiciones de mezcla inerte
<i>o</i>	Referido a las condiciones a la salida del orificio de la tobera
<i>O₂</i>	Referido a la especie oxígeno
<i>pr</i>	Referido a las especies producto de la reacción de oxidación
<i>sat</i>	Condiciones de saturación del equilibrio líquido-vapor
<i>soot</i>	Referido al hollín
<i>st</i>	Condiciones estequiométricas
<i>umbral</i>	Referido al valor umbral de segmentación de una imagen
λ	Dependiente de la longitud de onda

Acrónimos

ACT	Tiempo aparente de combustión
CAD	Grado de ángulo de cigüeñal (<i>Crank Angle Degree</i>)
CFD	Dinámica de fluidos computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
DHRL	Tasa de liberación de calor (<i>Derivative of the Heat Release Law</i>)
DI	Inyección Directa (<i>Direct Injection</i>)
ED	Modelo de combustión de disipación de vórtices (<i>Eddy Dissipation</i>)
FRED	Modelo de combustión de tasa limitada - disipación de vórtices (<i>Finite Rate - Eddy Dissipation</i>)

FL	Longitud de llama (<i>Flame Length</i>)
LIEF	Fluorescencia Excíplex Inducida por Láser (<i>Laser Induced Exciplex Fluorescence</i>)
LL	Longitud líquida máxima (<i>Liquid Length</i>)
LOL	Longitud de lift-off (<i>Lift-Off Length</i>)
MEC	Motor de Encendido por Compresión
PMS	Punto Muerto Superior
SOI	Inicio de Inyección (<i>Start Of Injection</i>)
TM	Tasa de mezcla en el eje
TTCDM	Tasa de transferencia de cantidad de movimiento en el eje
VCO	Orificio controlado directamente por la aguja (<i>Valve Covered Orifice</i>)

Capítulo 1

Introducción

1.1 Contexto general

Desde su aparición, la evolución de la humanidad ha venido marcada por la búsqueda continua de una mejora en sus condiciones materiales de existencia. Ello se ha conseguido gracias a un esfuerzo, realizado a lo largo de generaciones, dirigido a la construcción y mejora de máquinas y sistemas que permiten la superación de las limitaciones físicas del hombre. La mayoría de todos estos sistemas precisan de una fuente de energía mecánica que, salvo por los casos de aprovechamiento de las corrientes de agua o de aire, han sido las personas o los animales. No es hasta la aparición de la máquina de vapor, cuando entran en juego los motores de combustión, como sistemas de obtención de la energía mecánica a gran escala a partir de la energía química del combustible. Con ello se abrió el camino al desarrollo industrial y a una evolución continua de la humanidad que llega hasta nuestros días.

En la actualidad, un gran porcentaje de las transformaciones energéticas que tienen lugar en campos muy diversos de la actividad humana emplean un motor de combustión. Más concretamente, en el ámbito de la movilidad de personas y mercancías, aspecto característico de las denominadas sociedades desarrolladas, el monopolio de este tipo de máquinas es patente. Ello se refleja, en el caso de nuestro país, en el elevado porcentaje de recursos energéticos

dedicados al transporte. Según datos del IDAE [1]¹, en 2003 el consumo de energía final por parte del sector del transporte supuso un 39% del total de España, correspondiendo un 80% de esta cantidad al transporte por carretera de personas y mercancías.

Centrándonos en los sectores de la automoción y del transporte pesado por carretera, se puede afirmar que el Motor de Encendido por Compresión (MEC) constituye hoy en día la alternativa más eficiente desde el punto de vista energético. Si bien este tipo de motor ha sido el dominador tradicional en el sector del transporte comercial de personas y mercancías, no ha sido hasta recientemente cuando ha ganado terreno en el sector de la automoción. En Europa, este hecho se ha reflejado en las crecientes cifras de venta de los vehículos equipados con este motor, fenómeno que incluso ha acuñado un término, la llamada ‘dieselización’ del parque de automóviles.

El estatus alcanzado por el motor Diesel ha sido el resultado de una respuesta adecuada ante dos retos principales: la presión del mercado, que obliga a los fabricantes a producir motores con menores consumos específicos, mayores prestaciones y fiabilidad, y la legislación anticontaminante, que con el fin de preservar un medio ambiente cada día más degradado ha añadido un campo extra al abanico de parámetros a tener en cuenta durante el diseño y desarrollo de un motor. Ello ha obligado a los constructores a invertir una gran cantidad de recursos en investigación y desarrollo de nuevas soluciones para cumplir con todos los requisitos.

Gracias a estos esfuerzos se ha asistido a una verdadera revolución en el campo de los motores Diesel durante la última década del siglo XX, que tiene como hitos destacables la mejora en los sistemas de inyección y la optimización de la gestión del aire, juntamente con la aplicación de la electrónica al motor. Estos cambios han marcado la generalización de la tecnología de los motores Diesel de Inyección Directa (DI), con unas prestaciones en términos de potencia efectiva que han mejorado considerablemente con respecto a los diseños iniciales, y cuyas emisiones contaminantes son hoy en día mucho menores que las de hace escasamente veinte años. Si a ello se le añade su elevado rendimiento energético, y por tanto menor emisión de dióxido de carbono (principal gas de efecto invernadero) se puede entender la aceptación cada día mayor de este motor frente al de encendido provocado.

¹Las cifras entre corchetes corresponden a las referencias bibliográficas mostradas al final de cada capítulo por orden de aparición. Además, al final del libro se incluye una lista general de bibliografía ordenada alfabéticamente.

1.2 La investigación del proceso de combustión en motores Diesel

Dentro del ámbito del motor Diesel, una parte fundamental de la evolución ha venido gracias al avance en el conocimiento de los mecanismos básicos que ocurren durante la inyección del chorro Diesel y la posterior combustión del mismo. Estos procesos constituyen, por así decirlo, el ‘corazón’ del motor, el principio básico de liberación de energía dentro del mismo. La mejora en la descripción y cuantificación de los parámetros físico-químicos fundamentales ha sido posible gracias a la conjunción de los siguientes factores:

- En primer lugar, los *sistemas de diagnóstico convencionales* (medida de la señal de presión en cámara, medida del levantamiento de aguja del inyector...) han llegado a un elevado grado de madurez, lo que les hace ser parte de la instrumentación estándar en la mayoría de salas de ensayo. En concreto, el estudio de la combustión a partir de la liberación de calor ha proporcionado una gran cantidad de información básica del funcionamiento del motor.
- Por otra parte, se ha asistido a un desarrollo importante de las *técnicas ópticas de diagnóstico aplicadas al campo de la combustión*, principalmente gracias al empleo cada vez más generalizado de la tecnología láser y a la mejora en el equipamiento empleado. Como ejemplo de este último aspecto cabe señalar los cambios espectaculares habidos en cuanto a las cámaras de filmación, pasándose en menos de diez años de emplear las películas convencionales de cine como soporte físico de la imagen grabada, al uso de cámaras rápidas digitales intensificadas, cuyas prestaciones se superan continuamente. Esto ha hecho que otras técnicas ópticas más antiguas, como la visualización directa o el Schlieren, hayan podido ser refinadas y permitan obtener resultados notables acerca de los procesos que suceden durante la combustión del chorro Diesel.

Aunque en un principio la cuantificación con las técnicas ópticas es bastante complicada, existe ya un número considerable de variables de las cuales es posible obtener valores cuantitativos, aunque la fiabilidad de estos resultados suele depender de la aplicación de un elevado número de procedimientos de corrección y calibración. Este inconveniente queda compensado en gran parte por el carácter no intrusivo de los métodos ópticos, que les da una gran ventaja frente a otras técnicas de medida.

- Las mejoras en todas las técnicas de diagnóstico (convencionales y ópticas) han ido acompañadas de un *desarrollo importante de las instalaciones experimentales* para el estudio de los mecanismos básicos de inyección-combustión. Los motores con accesos ópticos directos o mediante endoscopios, las máquinas de compresión rápidas y las cámaras de volumen constante constituyen herramientas fundamentales para el estudio de todos estos procesos, y su número y calidad ha ido incrementándose de forma destacada en los últimos tiempos.
- Todo lo anterior ha ido en paralelo con el *perfeccionamiento de las herramientas de cálculo*, que permiten interpretar mediante modelos las medidas experimentales obtenidas y profundizar en su análisis. No cabe duda de que una parte fundamental del éxito de cualquier proceso investigador en este ámbito de la técnica reside en el aprovechamiento de la sinergia entre el análisis experimental de datos y su contrastación con cálculos. Con ello se mejora la comprensión de los procesos físicos, y se pueden crear los modelos de cálculo, que al final son las herramientas con las que el investigador describe y cuantifica fenómenos naturales.

Gracias a todos los avances anteriores, ya es posible describir la secuencia de fenómenos que llevan a la liberación de la energía del combustible dentro de la cámara de combustión de un motor Diesel. Los aspectos más generales pueden explicarse ya con cierto grado de detalle, formando un cuerpo de conocimiento bastante contrastado con información experimental. Sin embargo, queda bastante trabajo en el campo de la construcción de modelos, tanto conceptuales como numéricos, que expliquen y reproduzcan de forma fiel los fenómenos observados experimentalmente, con los cuales se pueda cuantificar y predecir el proceso de combustión bajo condiciones de contorno diversas.

1.3 Marco de trabajo

Esta monografía pretende conseguir un acercamiento al proceso de combustión que se da en un *motor Diesel de inyección directa de unos dos litros de cilindrada unitaria altamente sobrealimentado*². *Los parámetros cuantitativos que definirían este entorno*³ *son una presión de inyección del orden de 1500 bar*

²Lo que en inglés se conoce con el nombre de ‘Heavy-Duty Diesel Engine’.

³Cuando, a lo largo del texto, se hable de ‘condiciones de motor’ nos referiremos a la descripción de fenómenos bajo las condiciones mencionadas en este párrafo.

(o incluso mayor), un diámetro del orificio de la tobera de inyección comprendido entre 150 y 200 μm y unas condiciones termodinámicas del aire en la cámara de combustión con una densidad comprendida entre 20 – 50 kg/m^3 y una temperatura de 900 – 1000 K .

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, 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 antes del choque con la pared. Con todo 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.

El punto de vista elegido para analizar el proceso de combustión no va a estar centrado en el análisis experimental de los resultados de motor con el fin de optimizar su funcionamiento. Tampoco va a encontrar el lector una exposición de un modelo predictivo del chorro–llama Diesel que le permita predecir de forma exacta unas condiciones de motor concretas. La presente monografía se centra en la comprensión de los fenómenos físicos básicos que gobiernan la evolución del chorro–llama Diesel, y en su cuantificación sencilla. Se tratará de encontrar una serie de expresiones analíticas fácilmente manejables, que describan las distribuciones espaciales de velocidad o concentración en el chorro. A partir de ellas se sintetizarán las denominadas ‘leyes de escalado’, relaciones que contienen de forma explícita los parámetros controlantes, por ejemplo, de la longitud líquida del chorro en condiciones de evaporación, o del tamaño de la llama. En síntesis, el objetivo básico va a ser *desarrollar herramientas conceptuales que permitan analizar de forma sencilla los mecanismos físicos que gobiernan el proceso de combustión de los chorros Diesel*.

La línea argumental del libro va a estar basada en un análisis incremental. De acuerdo con ello, el problema final, la combustión del chorro Diesel en condiciones de motor, es afrontado partiendo de un problema mucho más sencillo, el chorro gaseoso isoterma. Sobre este caso se van a ir añadiendo de forma progresiva y lógica los fenómenos que han de tenerse en cuenta para

llegar a completar la descripción total del proceso en condiciones de motor. Así, un primer nivel de estudio es el chorro gaseoso turbulento, analizado en profundidad en los capítulos 4 y 5 ya que, como se defiende en este trabajo, constituye un referente de indudable valía e interés para el análisis del chorro Diesel. Los conceptos de chorro gaseoso han sido empleados para la descripción final del chorro Diesel en condiciones de motor, partiendo del conocimiento del chorro Diesel isoterma que existía en el grupo de investigación en el que el autor ha desarrollado el trabajo [2–5].

Por otra parte, la metodología empleada para la obtención y el análisis de resultados experimentales también se ha basado en el saber hacer de este grupo de investigación [6–10]. A todo ello se añade la información existente en la literatura científica acerca del tema, revisada en el capítulo 2. Sobre esta base, los razonamientos que se van a manejar están apoyados en fuentes de información de diversa procedencia. Así, para el desarrollo de los conceptos acerca del chorro gaseoso y Diesel se va a emplear una combinación de análisis teóricos y cálculos numéricos. Estos últimos incluyen cálculos de dinámica de fluidos computacional (CFD) como herramienta de estudio del chorro gaseoso en condiciones inertes o reactivas. La parte experimental tiene como base fundamental la obtención de información mediante técnicas de visualización del chorro líquido y de la luminosidad natural de la llama. La integración de todas estas fuentes de información permitirá ir construyendo una descripción cuantificada de los fenómenos de interés.

1.4 Sobre este libro

La estructura elegida para este libro está relacionada con la descripción hecha más arriba sobre la línea argumental que se va a seguir. En primer lugar se describe el punto de partida, tanto en cuanto a los procesos físicos que se van a analizar (capítulo 2) como a la metodología empleada (capítulo 3). Posteriormente, se realizan los análisis pertinentes sobre el problema (capítulos 4 al 7), para terminar con el capítulo de conclusiones.

En el *capítulo 2* se hace una descripción del estado del conocimiento del proceso de combustión en motores Diesel de inyección directa. No se trata de una revisión exhaustiva, pues la literatura existente acerca de cada uno de los procesos físicos que ocurren es ingente. Se ha intentado más bien hacer una descripción actualizada de cuáles son los fenómenos más importantes que caracterizan dicho proceso de combustión y cómo se entiende cada uno de

ellos. Con ello se realiza una síntesis de qué aspectos deberán ser afrontados en el análisis posterior, y cuales no requieren ser considerados en el ámbito del presente trabajo.

El *capítulo 3* presenta las herramientas que van a ser empleadas en este trabajo como complemento y validación de los desarrollos teóricos necesarios. Se trata de cálculos numéricos para el estudio de chorros gaseosos y de técnicas experimentales para obtención de información de chorros Diesel. Los primeros son importantes, puesto que gran parte del análisis aquí presentado pretende explicar el comportamiento de los chorros Diesel a partir del comportamiento de los chorros gaseosos, que son conceptualmente más sencillos. Las herramientas experimentales, en particular las técnicas de visualización de los procesos de inyección-combustión, permiten obtener información que valide los razonamientos realizados acerca del comportamiento del chorro Diesel.

Los *capítulos 4 y 5* están dedicados al chorro gaseoso estacionario. En el primero de ellos se realiza un análisis teórico en condiciones inertes basado en razonamientos sencillos de tipo analítico y en cálculos numéricos. Se parte del caso más simple, el chorro inerte isodenso, realizando un estudio detallado de su estructura. A partir del mismo se sientan las bases para estudiar el caso más general del chorro inerte, esto es, un chorro inyectado en un ambiente de diferente densidad y temperatura.

En el *capítulo 5* se amplía el estudio del chorro gaseoso estacionario para incluir el fenómeno de la reacción de combustión, completando la descripción del mismo. El análisis también parte de un caso sencillo, una reacción química sin liberación de calor, para definir el concepto de fracción de mezcla como variable conservativa que permite pasar del chorro inerte al de combustión, teniendo en cuenta los cambios en la composición local. A continuación se analiza el caso más general de chorro gaseoso con reacción exotérmica, empleando la fracción de mezcla y deduciendo leyes de escalado que cuantifiquen el efecto de la liberación de calor sobre la estructura del chorro reactivo, permitiendo relacionarlo con el caso inerte. Al igual que en el *capítulo 4*, aquí también se recurre a razonamientos teóricos y a cálculos numéricos.

En el *capítulo 6* se aplican los conceptos de chorro gaseoso inerte al estudio del chorro Diesel durante la primera parte de la inyección-combustión, cuando la liberación de calor es prácticamente nula. Tras un breve análisis comparativo de las diferencias entre el chorro gaseoso y el Diesel, se realiza un estudio del fenómeno de evaporación, que marca de forma clara la distinción

entre un tipo de chorro y otro. La fuente de información principal para validar los razonamientos es la experimental, a partir de técnicas de visualización.

En el *capítulo 7* se realiza una síntesis de los conceptos desarrollados en los capítulos anteriores 4, 5 y 6, aplicados en este caso a la descripción de la llama Diesel de difusión. Partiendo de esta base, se complementa dicha descripción mediante un estudio experimental que incluye aspectos no considerados con suficiente profundidad en los capítulos previos. En concreto, este estudio permite analizar el fenómeno del despegue de llama ('*flame lift-off*') así como la distribución espacial del hollín a partir del método de los dos colores, que además proporciona información acerca de la temperatura de la llama.

Finalmente, *el capítulo 8* sintetiza las conclusiones más importantes del presente trabajo, junto con las líneas directrices para la continuación del mismo.

Bibliografía

- [1] IDAE. *Boletín IDAE Eficiencia Energética y Energías Renovables (Nº 7)*. Editorial del Instituto de Diversificación y Ahorro Energético (IDAE), 2005.
- [2] Arrègle J. *Análisis de la estructura y dinámica interna de chorros Diesel*. Tesis Doctoral, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1997.
- [3] Correas D. *Estudio teórico-experimental del chorro libre Diesel isoter-mo*. Tesis Doctoral, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1998.
- [4] Ruiz S. *Estudio Teórico-Experimental de los procesos de atomización y de mezcla en los chorros diesel D.I.* Tesis Doctoral, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003.
- [5] López J. J. *Estudio teórico-experimental del chorro libre Diesel no evapo-rativo y de su interacción con el movimiento del aire*. Editorial Reverté, S.A., Barcelona, 2005.

-
- [6] Palomares A. *Análisis de imágenes de chorros Diesel*. Tesis Doctoral, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2001.
- [7] Juliá J.E. *Análisis de chorros Diesel mediante fluorescencia inducida por láser*. Editorial Reverté, S.A., Barcelona, 2006.
- [8] Armas O. *Diagnóstico experimental del proceso de combustión en motores Diesel de inyección directa*. Tesis Doctoral, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1998.
- [9] Molina S. A. *Influencia de los parámetros de inyección y la recirculación de gases de escape sobre el proceso de combustión en un motor Diesel*. Editorial Reverté, S.A., Barcelona, 2005.
- [10] Fenollosa C. *Modelado fenomenológico del proceso de combustión por difusión Diesel*. Editorial Reverté, S.A., Barcelona, 2005.

Capítulo 2

Fenomenología del proceso de combustión en un motor Diesel de inyección directa

2.1 Introducción

En este capítulo se va a realizar una descripción de los procesos físicos principales que tienen lugar dentro de la cámara de combustión de un motor Diesel de inyección directa, gracias a los cuales se libera la energía del combustible. Se va a adoptar un enfoque conceptual, que intente describir dichos fenómenos de forma cualitativa pero sin renunciar al detalle. Como comenta Lapuerta [1], *desde un punto de vista puramente empírico el investigador utiliza modelos conceptuales del proceso que observa*. Dichos modelos conceptuales no son más que un primer paso (normalmente obligatorio) en el análisis. Las categorías mentales que se manejan durante su elaboración son a menudo únicamente descriptivas, cualitativas, pero permiten identificar los parámetros principales (las futuras variables) sobre los que deben asentarse los modelos de cálculo predictivos, que como también comenta Lapuerta, *cuantifican y organizan estos conceptos en forma de conjuntos de ecuaciones de forma manejable y resoluble por un ordenador*. Si bien el objetivo de muchos proyectos de investigación en el campo de las ciencias físicas consiste en la obtención de un modelo de cálculo para la predicción del fenómeno estudiado, debemos considerar que un buen modelo conceptual es una etapa necesaria previa a la cuantificación, y que necesariamente indica un grado de conoci-

miento avanzado en la materia. A este respecto y en el campo que aquí nos ocupa, Dec [2] indica que *un modelo preciso* (del proceso de combustión Diesel) *proporcionaría un marco de trabajo para interpretar medidas experimentales, guiar el desarrollo del modelado numérico y proporcionar a los diseñadores de motores una imagen mental de qué es su pensamiento.*

El capítulo se estructura de la siguiente manera: en primer lugar se presenta la definición tradicional de las fases del proceso de combustión Diesel a partir de las leyes de inyección y de liberación de calor. Los apartados posteriores afrontan la descripción de estos procesos desde el punto de vista de un chorro que, al inyectarse, se mezcla con el aire, se autoenciende y acaba transformándose en una llama de difusión. En cada una de estas fases ocurren procesos físico-químicos que alteran la estructura del chorro y que son descritos de forma detallada. Finalmente, en el último punto se intenta enlazar ambas descripciones, la tradicional de las fases de combustión con la de la evolución del chorro. Para ello se realiza una presentación cronológica que concatena todos los procesos físicos que sufre un chorro de combustible desde el inicio de inyección hasta el establecimiento de la reacción exotérmica autosustentada, momento en que el proceso de combustión llega a un cierto periodo de estabilidad. La evolución es enlazada con la de la ley de liberación de calor. Este último punto sirve como resumen del estado del conocimiento sobre el tema de esta monografía y punto de partida para los capítulos sucesivos.

2.2 Fases del proceso

La forma probablemente más clásica de estudiar la evolución del proceso de combustión en motores Diesel es la comparación entre la evolución temporal de la masa de combustible inyectada por unidad de tiempo (*tasa*⁴ *de inyección*) y la energía aparentemente liberada por el proceso de combustión por unidad de tiempo, calculada a partir de la medida de la presión en el cilindro (*tasa de liberación de calor o tasa de combustión*). Este último cálculo está basado en la aplicación de la primera ley de la termodinámica al volumen encerrado en el cilindro en cada instante (sirva como por ejemplo el trabajo de Payri et al. [3]), representando la intensidad con que se libera la energía química que contiene el combustible, esto es, cómo de rápido se produce el proceso de combustión. En la figura 2.1 se puede observar una comparación entre ambas

⁴En esta monografía se emplea la palabra ‘tasa’ de una variable (masa inyectada, temperatura, liberación de calor,...) para referirse a la derivada temporal de dicha variable.

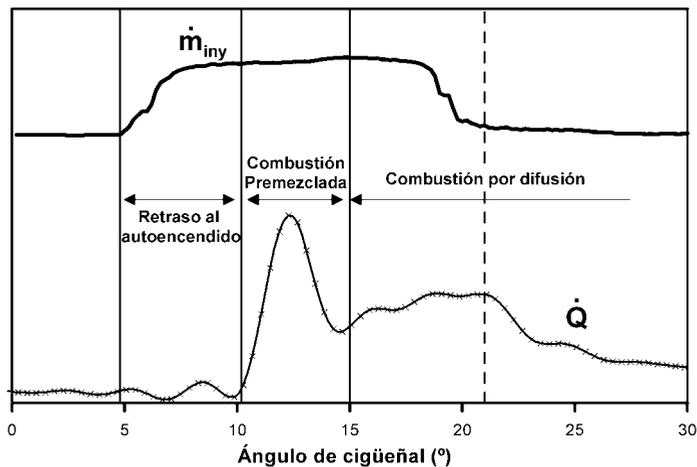


Figura 2.1: Definición de las fases de la combustión a partir de la comparación temporal entre las tasas de inyección de combustible (curva superior) y la de liberación de calor (curva inferior).

evoluciones temporales obtenidas experimentalmente en el motor de inyección directa con accesos endoscópicos descrito en el capítulo 3. Se suelen distinguir tres fases principales [4–6]:

- Se aprecia un primer intervalo de tiempo tras el inicio del proceso de inyección (instante en que la tasa de inyección crece por encima de cero) durante el cual aparentemente no hay liberación de calor importante (esta afirmación se matizará en el apartado 2.4). En este espacio de tiempo el chorro se mezcla con el aire gracias a la sucesión de todos los procesos físicos que se describen en el apartado 2.3 (atomización, englobamiento de aire y evaporación). Puesto que la atmósfera dentro de la cámara de combustión contiene oxígeno, la mezcla aire-combustible formada no es estable, y en el seno de la misma comienzan a darse prerreacciones químicas de baja intensidad que producen la rotura de las moléculas de combustible en cadenas de hidrocarburos más cortas así como la formación de radicales libres. Todo ello lleva al autoencendido espontáneo de la mezcla, esto es, la aparición de una zona de reacción altamente exotérmica en el chorro (apartado 2.4) que define el inicio de la combustión. Dicho proceso se manifiesta en la gráfica anterior mediante un crecimiento súbito de la ley de liberación de calor, completándose con

ello la primera fase de la combustión, que usualmente se denomina *fase de retraso al autoencendido*, aunque aquí se usará *fase de retraso* por razones de brevedad. En el caso de los motores Diesel de inyección directa de transporte pesado, la duración de la fase de retraso (el llamado *tiempo de retraso*, τ_{delay}) es de unos 0.5 ms, valor que depende obviamente de las condiciones operativas del motor [6].

- Una vez comienza la liberación apreciable de calor, se distinguen dos fases más. La primera, que se suele denominar *fase de combustión premezclada*, tiene un carácter más transitorio en el tipo de motor que aquí se va a analizar. En ella se quema todo el combustible que, debido al proceso de mezcla que ha tenido lugar durante la fase anterior, está dentro de los límites de inflamabilidad pero todavía no ha podido reaccionar debido a que los procesos químicos no habían llegado a las condiciones necesarias para el autoencendido. La combustión de toda esta mezcla acumulada hace que la energía se libere con una tasa bastante elevada, originando el primer máximo característico de la curva de liberación de calor. La duración de esta fase se suele definir desde el inicio de combustión hasta el primer mínimo de la curva de liberación de calor y, como se verá, es del mismo orden del tiempo de retraso. También los fenómenos físico-químicos van a estar en relación con aquellos que han tenido lugar durante la fase de autoencendido (apartado 2.4).
- Cuando la masa mezclada durante la fase de retraso se quema completamente, la liberación de calor prosigue con una tasa más baja correspondiente a la llamada *fase de combustión por difusión* (apartado 2.5). Aquí se suele admitir [4, 7] que el calor se libera en la medida en que se va produciendo la mezcla entre aire y combustible (de hecho, muchos autores usan la denominación de *fase de combustión controlada por mezcla*). Mientras dura la inyección, este proceso de mezcla está controlado por la cantidad de movimiento que introduce el chorro en la cámara de combustión. La estructura de la llama alcanza un periodo de cuasi-estacionariedad, que se mantiene en tanto en cuanto se sigue inyectando combustible. En el momento en que el proceso de inyección llega al final se observa una caída de la tasa de liberación de calor al empeorar el proceso de mezcla debido a la desaparición del aporte de cantidad de movimiento por parte de la inyección. La estructura de la llama toma una forma bastante más aleatoria, y la combustión va perdiendo intensidad hasta que termina.

2.3 Formación de la mezcla aire-combustible en un chorro Diesel

Durante la primera parte de la fase de retraso al autoencendido, los procesos que van a tener lugar para la realización del proceso de mezcla entre el chorro de combustible y el aire son similares a los que ocurrirían con chorros inyectados en atmósferas de gases inertes, esto es, un proceso de intercambio de propiedades de carácter puramente físico, a no ser por la presencia de oxígeno que hace que la mezcla resultante sea reactiva, incorporando el fenómeno químico al proceso. Debido a la conveniencia de analizar por separado ambos aspectos físicos y químicos, tradicionalmente se ha recurrido al estudio de chorros en atmósferas no reactivas para investigar los fenómenos físicos básicos del proceso de mezcla, que son los que se analizan en este apartado.

Si además se va un paso más allá en la simplificación y se asume que no existe diferencia de temperatura entre el combustible inyectado y el ambiente (supuestamente inerte) en que éste se inyecta, no aparecería el fenómeno de evaporación del combustible líquido. El comportamiento del chorro durante el proceso de mezcla sería el descrito en los trabajos de Correas [8], Arrègle [9], Ruiz [10] o López [11], esto es, un chorro de combustible líquido isoterma en ambiente no reactivo. Estos autores realizan estudios bastante exhaustivos de los fenómenos físicos de mezcla, por lo que aquí simplemente se va a recordar una serie de nociones que sean útiles a la hora de explicar el comportamiento del chorro bajo las condiciones reales de motor, principalmente en lo que respecta al proceso físico de atomización del chorro líquido. Posteriormente se analiza el fenómeno de la evaporación del combustible, con lo que se completa la descripción de la física de mezcla del chorro Diesel durante la fase inicial del proceso de inyección, en la que la liberación de calor no ha producido cambios importantes en el comportamiento del chorro respecto al que tendría en un ambiente inerte. Se deja aquí de lado el estudio del flujo interno en la tobera y, como consecuencia del mismo, el proceso de cavitación, analizado con más detalle por Salvador [12].

2.3.1 Atomización

El primer fenómeno que tiene lugar tras la descarga del chorro Diesel por la tobera es la atomización de la vena líquida, la cual deja de formar

un medio continuo para pasar a romperse en gotas de diverso tamaño. Con ello aumenta la superficie de contacto existente entre el aire y el combustible, favoreciendo los procesos físicos de mezcla entre ambos (englobamiento de aire y evaporación).

En los chorros líquidos en régimen turbulento, entre los cuales se encontraría el chorro Diesel de inyección directa, el proceso de atomización se completa a partir de una determinada distancia axial respecto al orificio de salida del combustible. A partir de esa posición, la vena líquida continua que se descarga por el orificio del inyector desaparece, y se tiene únicamente gotas rodeadas por el gas englobado. Esta distancia es denominada usualmente *longitud líquida* o también *longitud intacta o de rotura*, preferiéndose aquí este último término para evitar confusiones con la longitud máxima que alcanza la fase líquida cuando se trata de chorros inyectados en ambientes evaporativos.

El valor de la longitud intacta depende de las condiciones (tipo de combustible y de ambiente, densidad de ambas fases, velocidad de salida, geometría de la tobera...), distinguiéndose por ello diversos regímenes de atomización. El trabajo de Arrègle [9], de corte experimental, concluye que bajo las condiciones actuales empleadas en el diseño de motores Diesel de inyección directa, los chorros en condiciones no reactivas y no evaporativas se encuentran siempre en un único régimen de atomización, el llamado ‘régimen de atomización completa’, en el que la longitud intacta resulta ser independiente de la velocidad de salida del combustible y del tamaño de las gotas, y es del mismo orden que el diámetro del orificio de salida de la tobera. Ello asegura que los mecanismos físicos de disgregación de la vena líquida sean los mismos en todas las condiciones de operación.

Por su parte, Correas [8] indica que no hay acuerdo entre los investigadores acerca del valor final de esta longitud en condiciones de motor. Se acepta en todos los casos que la relación de densidades entre el chorro y el ambiente es el parámetro controlante, pero la cuantificación de la influencia final de la misma depende de la fuente consultada. A pesar de esta falta de unanimidad, la mayoría de los estudios coinciden en que, en condiciones de motor, el chorro va a estar formado por una mezcla en la cual hay una fase líquida totalmente disgregada casi desde la salida del orificio. De hecho, Smallwood y Gülder [13] apuntan en una revisión bastante reciente que la longitud intacta es de unos pocos diámetros de tobera. Para ello citan trabajos de diversos autores con técnicas experimentales diferentes en los cuales, o bien no se observa longitud intacta alguna, estando el chorro totalmente atomizado desde la salida, o bien esta longitud es de 1–3 diámetros de tobera. Por su parte, Levy et al. [14]