



TEMAS AVANZADOS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

F. Payri/J.M^a. Desantes

INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE INYECCIÓN Y LA RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE SOBRE EL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN UN MOTOR DIESEL


motores térmicos

 UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE VALÈNCIA

SANTIAGO A. MOLINA



EDITORIAL REVERTÉ

TEMAS AVANZADOS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

F. Payri/J.M^a. Desantes

**INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE INYECCIÓN
Y LA RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE
SOBRE EL PROCESO DE COMBUSTIÓN
EN UN MOTOR DIESEL**

SANTIAGO A. MOLINA

Dr. Ingeniero Industrial

Profesor Ayudante Doctor
del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos



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 los parámetros de inyección y la regulación de gases de escape sobre el proceso de combustión de un motor Diesel

Copyright © Santiago A. Molina

Edición en papel:

© Editorial Reverté. S.A., 2005

ISBN: 978-84-291-4704-9

Edición en e-book:

© Editorial Reverté. S.A., 2020

ISBN: 978-84-291-9088-5

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15, Local B

08029 Barcelona

Tel: (34) 93 419 33 36

E-mail: reverte@reverte.com

Internet: <http://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 prologar este libro que recoge parte del trabajo de investigación desarrollado en CMT-Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia por su autor, el Dr. Santiago Molina, trabajo que se enmarca dentro de los objetivos generales de este grupo encaminados a desarrollar conocimiento para la optimización de las plantas motrices de vehículos automóviles desde el punto de vista de las emisiones contaminantes, el rendimiento y el resto de condiciones y requerimientos de diseño relevantes para cada aplicación.

Concretamente, este trabajo se centra en los motores Diesel típicos de transporte pesado por carretera empleados intensivamente en la Unión Europea, y aborda dos aspectos fundamentales como son la influencia de los parámetros de inyección de combustible y la influencia de la recirculación de los gases de escape sobre el proceso de combustión y por tanto sobre la evolución de la presión y la temperatura dentro del cilindro, el rendimiento del motor y las emisiones de escape.

Considero que este trabajo es una contribución relevante tanto desde el punto de vista del conocimiento y mejor comprensión del proceso de combustión por difusión en motores Diesel de transporte pesado, como desde el punto de vista del planteamiento metodológico para obtenerlo. Aunque la cimentación del trabajo es eminentemente empírica, manejando las bases de datos experimentales obtenidos en múltiples ensayos realizados sobre un motor monocilíndrico de investigación que opera en condiciones absolutamente controladas, el autor no rehuye el confrontar la evidencia experimental con distintos modelos conceptuales asociados a los procesos de inyección, evaporación y mezcla del combustible con el aire y el proceso de combustión y formación de emisiones contaminantes, fundamentalmente NO_x y partículas de hollín, para enriquecer el análisis de la base de datos experimental obtenida con explicaciones y razonamientos teóricos que ayudan a comprender los complejos procesos que se desarrollan en el interior del cilindro.

Aunque el objetivo del trabajo no es la optimización del motor, a lo largo de los distintos capítulos se realizan sistemáticamente comparaciones entre los parámetros obtenidos para cada condición de operación y los límites fijados por las normas correspondientes a EURO III y EURO IV lo que añade una dimensión más práctica al trabajo presentado.

Por último, quiero presentar brevemente al autor de este trabajo, con el que he tenido la enorme satisfacción de compartir muchas horas de estudio y trabajo.

El Dr. Molina cursó los estudios de Ingeniería en la Universidad Nacional de San Juan, Argentina, finalizando estos en el año 1996. A continuación inició su carrera docente e investigadora en el Instituto de Mecánica Aplicada de dicha Universidad. Los estudios de postgrado los realizó en la Universidad Politécnica de Valencia, España, dónde se doctoró en el año 2003. En la actualidad ocupa una plaza de Profesor Ayudante Doctor en el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia. Su labor investigadora se realiza dentro del grupo CMT-Motores Térmicos y se centra en el estudio teórico-experimental del proceso de combustión en motores Diesel de inyección directa, tema en el que el autor tiene publicados varios trabajos en revistas y congresos internacionales.

José María Desantes Fernández
Catedrático de Universidad
CMT – Motores Térmicos
Universidad Politécnica de Valencia

Índice General

Lista de símbolos	xiii
1 Introducción	1
1.1 Marco tecnológico y normativo	1
1.2 Planteamiento del trabajo	6
1.3 Metodología.....	8
1.4 Contenido del libro	11
1.5 Modelo conceptual del proceso de inyección-combustión.....	12
1.5.1 Descripción temporal del proceso de combustión.....	14
1.5.2 Descripción espacial del proceso de combustión	17
1.6 Bibliografía.....	21
2 Instalaciones y metodología experimental	23
2.1. Introducción.....	23
2.2. Sala de ensayo	24
2.2.1 Descripción del motor.....	24
2.2.2 Sistema de inyección	26
2.2.3 Sistemas auxiliares	28
2.2.3.1 Sistemas de admisión y escape	28
2.2.3.2 Circuito de recirculación de gases de escape (EGR).....	31
2.2.3.3 Sistemas de lubricación y refrigeración	32
2.2.3.4 Sistema de acondicionamiento de temperatura del combustible.....	33

2.3. Equipos de medida	34
2.3.1 Freno electromagnético.....	34
2.3.2 Sistema de adquisición de señales variables	35
2.3.2.1 Captador de presión en el cilindro y acondicionador	35
2.3.2.2 Captador de levantamiento de aguja.....	36
2.3.2.3 Codificador angular.....	37
2.3.2.4 Sistema de medida.....	37
2.3.3 Equipo de análisis de gases.....	38
2.3.3.1 Medida de óxidos de nitrógeno (NOx)	38
2.3.3.2 Medida de hidrocarburos totales (THC)	39
2.3.3.3 Medida de monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO ₂)	40
2.3.3.4 Medida de Oxígeno (O ₂)	40
2.3.4 Equipo de medida de hollín	41
2.3.5 Equipo de medida de tasa de inyección	42
2.3.6 Medidores de caudal másico	44
2.3.6.1 Medidor de caudal de aire.....	44
2.3.6.2 Medidor de caudal de combustible.....	44
2.4. Metodología de ensayo.....	45
2.4.1 Definición de condiciones de ensayo.	45
2.4.2 Rutina para los ensayos de prestaciones	46
2.5. Bibliografía.....	48
3 Herramientas teóricas	51
3.1 Introducción.....	51
3.2 Modelo de diagnóstico de la combustión	52
3.2.1 Planteamiento del modelo.....	52
3.2.2. Datos de entrada y resultados del modelo de diagnóstico	55
3.3 Modelo de cálculo de la temperatura de los productos de la combustión	58
3.3.1 Planteamiento del modelo.....	58

3.3.2	Definición de las variables.....	60
3.3.2.1	Balance másico.....	60
3.3.2.2	Cálculo de los calores específicos.....	61
3.3.2.3	Cálculo de la temperatura sin quemar	63
3.3.2.4	Cálculo de la temperatura de quemados	63
3.4	Mecanismos de formación y destrucción de contaminantes.....	67
3.4.1	Introducción	67
3.4.2	Combustión estequiométrica.....	67
3.4.3	Modelo de equilibrio	69
3.4.4	Óxidos de nitrógeno (NO y NO ₂).....	71
3.4.5	Emisión de partículas. Hollín.....	75
3.5	Bibliografía.....	77
4	Estudio paramétrico I. Presión de inyección y ángulo de inicio de inyección	85
4.1	Introducción.....	85
4.2	Definición del estudio paramétrico.....	87
4.3	Influencia de los parámetros estudiados sobre el combustible inyectado	88
4.3.1	Influencia sobre la tasa de inyección.....	89
4.3.2	Influencia sobre la evolución del chorro	92
4.4	Resultados de los ensayos en motor. <i>Trade-off</i>	95
4.5	Sensibilidad	100
4.5.1	Consumo específico de combustible.....	100
4.5.2	Emisión de NO _x	101
4.5.3	Emisión de hollín.....	103
4.6	Influencia de los parámetros estudiados sobre el proceso de combustión	104
4.6.1	Tiempo de retraso.....	104
4.6.2	Presión y temperatura en cámara.....	107
4.6.3	Ley de liberación de calor.....	109

4.6.3.1	Combustión premezclada.....	111
4.6.3.2	Angulo de 75% de combustible quemado.....	113
4.6.3.3	Duración de la combustión. Combustión por difusión ...	114
4.7	Análisis de los resultados	117
4.7.1	Consumo específico de combustible.....	118
4.7.2	Emisión de NOx	120
4.7.3	Emisión de hollín.....	122
4.8	Conclusiones.....	125
4.9	Bibliografía.....	127
4.10	Anexo 4.1	129
5	Estudio paramétrico II. Pre- y post-inyección	133
5.1	Introducción.....	133
5.2	Definición del estudio paramétrico	135
5.2.1	Matriz de ensayos para pre-inyección	136
5.2.2	Matriz de ensayos para post-inyección	137
5.3	Resultados con pre-inyección	137
5.3.1	<i>Trade-off</i>	137
5.3.2	Sensibilidad del motor a la pre-inyección.....	140
5.3.2.1	Consumo específico de combustible	140
5.3.2.2	Emisión de NOx	141
5.3.2.3	Emisión de hollín	142
5.3.3	Influencia de la pre-inyección sobre el proceso de combustión	144
5.3.4	Análisis de los resultados.....	147
5.3.4.1	Consumo específico de combustible	147
5.3.4.2	Emisión de NOx	149
5.3.4.3	Emisión de Hollín.....	151
5.4	Resultados con post-inyección	152
5.4.1	<i>Trade-off</i>	152
5.4.2	Sensibilidad del motor a la post-inyección	156

5.4.2.1	Consumo específico de combustible	156
5.4.2.2	Emisión de NOx	158
5.4.2.3	Emisión de hollín	159
5.4.3	Influencia de la post-inyección sobre el proceso de combustión	160
5.4.4	Análisis de los resultados.....	164
5.4.4.1	Consumo específico de combustible	164
5.4.4.2	Emisión de NOx	167
5.4.4.3	Emisión de hollín	168
5.5	Conclusiones.....	170
5.6	Bibliografía.....	172
5.7	Anexo 5.1	175
5.8	Anexo 5.2	177
6	Estudio paramétrico III. Recirculación de gases de escape y presión de admisión	179
6.1	Introducción.....	179
6.2	Definición del estudio paramétrico.....	182
6.3	Definiciones asociadas al uso de EGR.....	183
6.4	Resultados de los ensayos en motor. <i>Trade-off</i>	187
6.5	Sensibilidad	193
6.5.1	Consumo específico de combustible.....	193
6.5.2	Emisión de NOx	195
6.5.3	Emisión de hollín.....	196
6.5.4	Emisión de CO	198
6.6	Influencia del EGR sobre proceso de combustión	199
6.6.1	Introducción	199
6.6.2	Influencia del EGR sobre la masa admitida.....	200
6.6.2.1	Incremento de la temperatura de admisión	200
6.6.2.2	Disminución de la masa admitida	201
6.6.2.3	Variación en la composición de la masa admitida	202

6.6.2.4	Incremento en el calor específico de la masa admitida ..	203
6.6.3	Influencia sobre la presión y temperatura en el cilindro al final del proceso de compresión.....	204
6.6.4	Influencia sobre la temperatura adiabática de llama	206
6.6.5	Influencia sobre el tiempo de retraso.....	207
6.6.6	Influencia sobre la combustión premezclada	210
6.6.7	Influencia sobre la combustión por difusión.....	211
6.7	Análisis de los resultados	215
6.7.1	Consumo específico de combustible.....	215
6.7.2	Emisión de NOx	217
6.7.3	Emisión de hollín.....	221
6.8	Conclusiones.....	224
6.9	Bibliografía.....	225
6.10	Anexo 6.1	228
6.11	Anexo 6.2	231
6.12	Anexo 6.3	232
7	Conclusiones y desarrollos futuros	235
7.1	Conclusiones.....	235
7.1.1.	Conclusiones referentes a la metodología y herramientas.....	235
7.1.2	Conclusiones de los estudios paramétricos.....	237
7.2	Desarrollos futuros.....	238
	Bibliografía general	241

Lista de símbolos

Latinos

A	Área	m ²
a	Velocidad del sonido	m/s
A/F	Relación aire combustible	---
Cd	Coefficiente de descarga de un orificio	---
Cm	Velocidad lineal media del pistón	m/s
c _p	Calor específico a presión constante	J/kgK
c _v	Calor específico a volumen constante	J/kgK
D	Diámetro del cilindro	m
d	Diámetro	m
d _T	Diámetro del orificio de la tobera	m
E _A	Energía de activación	J/kg
F	Dosado	---
F/A	Relación combustible aire	---
F _R	Dosado relativo	---
Ge	Consumo específico de combustible	g/kWh
Gi	Consumo indicado de combustible	g/kWh
h	Entalpía	J
H	Coefficiente de película entre el gas y la pared	J/m ² K
hollín	Emisión de hollín	g/kWh
ICO	Índice de emisión de CO	g/kg_comb
IHollín	Índice de emisión de hollín	g/kg_comb
INOx	Índice de emisión de NOx	g/kg_comb
K _H	Corrección por humedad	---
K _f	Constante para la ec. de formación de hollín	---

K_{ox}	Constante para la ec. de oxidación de hollín	---
\dot{m}	Gasto másico	g/s
mf	Masa de combustible inyectada	mg/ciclo
Mipm	Masa inyectada entre el inicio de inyección y el inicio de la combustión por difusión	mg
Mqpm	Masa quemada durante la combustión premezclada	mg
n	Número de moles	----
N	Régimen de giro	rpm
NO _x	Emisión de NO _x	g/kWh
n_T	Número de orificios en la tobera	----
p	Presión en el cilindro	bar
PA	Presión de admisión	bar
PE	Presión de escape	bar
PI	Presión de inyección	bar
\dot{Q}_L	Tasa de calor liberado	W
\dot{Q}_w	Tasa de calor transmitido a las paredes	W
R	Constante universal de los gases	kJ/kgK
R	Velocidad de reacción	
Re	Número de Reynolds	---
S	Penetración del chorro	m
t	Tiempo	s, ms
T	Temperatura	K, °C
T_{ad}	Temperatura adiabática de llama	K
T_q	Temperatura de los productos de quemados	K
$T_{q,max}$	Temperatura de los productos quemados máxima	K
$T_{q,75\%}$	Temperatura de los productos quemados cuando se ha liberado el 75% del calor total	K
u	Energía interna	J
u_f	Velocidad del combustible	m/s
V	Volumen que ocupa la mezcla en el cilindro	m ³
We	Número de Weber	---
Y	Fracción másica de un componente de la mezcla en el cilindro	---
Z	Número de cilindros	---
[O ₂]	Concentración volumétrica de oxígeno	%
[O ₂]*	Concentración másica de oxígeno	%
[CO ₂]	Concentración volumétrica de dióxido de carbono	%
[NO]	Concentración volumétrica de monóxido de carbono	ppm

Griegos

α	[NO] / [NO] _e	---
Δ	Incremento	---
γ	Exponente de la adiabática	---
λ	Exceso de aire	---
μ	Viscosidad dinámica	kg/m ² s ²
θ	Ángulo de apertura del chorro	grados
ρ	Densidad	kg/m ³
τ	Tiempo de retraso	ms

Subíndices

a	aire, ambiente
ADM	admisión
AIRE	aire
ATM	atmósfera
bb	<i>blow by</i>
CA	cierre de la admisión
e	equilibrio
efe	efectivo
EGR	gases recirculados
ESC	escape
est	estequiométrico
f	combustible
fg	combustible evaporado
fo	formación de hollín
h	hollín
i	inicial
m	mezcla de gases atrapados en el cilindro
min	mínimo
O2	oxígeno
ox	oxidación de hollín
q	mezcla de gases quemados en el cilindro
ref	refrigerante del motor
sq	mezcla de gases sin quemar en el cilindro
w	pared
0	punto de referencia

Siglas

AQ75	Ángulo respecto al PMS donde se ha liberado el 75% del calor total	grados
AQ90	Ángulo respecto al PMS donde se ha liberado el 90% del calor total	grados
EOI	Ángulo de finalización de la inyección	grados
DFQL	Derivada de la fracción de calor liberado	---
DC	Duración de la combustión	grados
DI	Duración de la inyección	ms
DMS	Diámetro medio de Sauter	μm
EGR	Recirculación de gases de escape	%
FQL	Fracción de calor liberado	---
FQPM	Fracción de combustible quemado en premezcla	---
GC	Grado de carga del motor	%
HDDE	Motores de transporte pesado por carretera (<i>Heavy Duty Diesel Engine</i>)	---
PMS	Punto muerto superior	---
PCI	Poder calorífico inferior del combustible	kJ/kg
ppm	Partes por millón	---
RCO	Relación de concentración de oxígeno	---
rpm	Revoluciones por minuto	min^{-1}
SOC	Ángulo de inicio de combustión	grados
SOCD	Ángulo de inicio de la combustión por difusión	grados
SOI	Ángulo de inicio de inyección	grados
TEGR	Tasa de recirculación de gases de escape	%
THC	Hidrocarburos totales	ppm

Capítulo 1

Introducción

1.1 Marco tecnológico y normativo

Los motores Diesel de cilindrada total de alrededor de doce litros y cilindradas unitarias de dos litros son, salvo escasas excepciones, la única planta motriz empleada en la Unión Europea para vehículos de transporte pesado por carretera o transporte interurbano de pasajeros. Estos motores se conocen en la literatura en idioma inglés como *Heavy Duty Diesel Engines* (HDDE).

Esta planta motriz ha evolucionado en los últimos años hasta alcanzar actualmente potencias específicas del orden de 25 kW/litro con una presión media efectiva máxima del orden de 25 bar. La velocidad lineal media del pistón en el régimen de giro de máxima potencia está alrededor de 10 m/s y es posible conseguir consumos específicos de combustible, medidos sobre la base del Ciclo Estacionario Europeo (ESC), conocido también como trece modos, del orden de 200 g/kWh. Por otra parte estas plantas motrices han alcanzado elevadas cotas de fiabilidad, mantenibilidad y conductibilidad con curvas de par en función del régimen de giro muy adaptadas al tipo de aplicación. El gran reto al que se enfrentan estas plantas motrices es la reducción sistemática de los niveles de emisiones contaminantes que las normativas cada vez más restrictivas imponen, así como la severidad de los ensayos de homologación. Tradicionalmente las normas de control de emisiones han contem-

plado como emisiones gaseosas los óxidos de nitrógeno (NOx), los hidrocarburos sin quemar (THC) y el monóxido de carbono (CO). Adicionalmente para los motores Diesel se comenzó regulando la opacidad de los gases de escape (EURO I y II), que posteriormente se reemplazó por la medida de la masa de materia atrapada en un filtro después de diluir los gases de escape en aire hasta alcanzar temperaturas del orden de 50°C. A este cuarto contaminante legislado se le conoce por materia particulada (*Particulate Matter*) o más sencillamente partículas. En la normativa actualmente vigente (EURO III) [1]¹ se contempla un límite tanto para la masa de partículas como para la opacidad de humos, que son evaluados en dos ensayos diferentes como se describe posteriormente. Estos motores Diesel de transporte pesado son, con la tecnología actual, poco problemáticos desde el punto de vista de las emisiones de hidrocarburos sin quemar y de monóxido de carbono. El desafío en realidad consiste en reducir simultáneamente las emisiones de óxidos de nitrógeno y partículas sin deteriorar las emisiones de hidrocarburos sin quemar y las emisiones de monóxido de carbono, manteniendo o incluso reduciendo el consumo específico de combustible.

La tabla 1.1 muestra la evolución que han tenido a lo largo de los últimos 20 años y la previsión para el futuro de los límites máximos permitidos para los distintos compuestos considerados como contaminantes.

Tabla 1.1 Evolución de los límites de emisiones de escape a través de los años, para motores HDDE. Normativa Europea.

	NOx (g/kWh)	Partículas (g/kWh)	CO (g/kWh)	THC (g/kWh)
Año 1982	18.0	0.70 *	14.0	3.50
EURO I (1992)	8.0	0.36	4.5	1.10
EURO II (1996)	7.0	0.25	4.0	1.10
EURO III (2000)	5.0	0.10	2.5	0.66
EURO IV (2005)	3.5	0.02	1.5	0.46
EURO V (2008)	2.0	0.02	1.5	0.46

* La legislación de las partículas es posterior a 1982, el valor corresponde al año 1990.

¹ Los números entre corchetes corresponden a las referencias bibliográficas mostradas al final de cada capítulo por orden de aparición. Al final del libro se pueden encontrar todas las referencias bibliográficas ordenadas alfabéticamente e indicando el capítulo donde han sido citadas.

Los valores indicados en esta tabla muestran la fuerte reducción que se ha ido produciendo a lo largo de los años. Así, el límite de los óxidos de nitrógeno se ha reducido desde 1982 hasta la fecha en un 72% y se prevé una reducción del 89% (respecto al nivel de 1982) para el año 2008. El límite en la emisión de CO y THC ha disminuido aproximadamente en un 82% y para el año 2008 la reducción será del orden del 88%. La emisión de partículas, como se dijo anteriormente, no estaba legislada como tal y fue a partir de la década del 90 cuando se empezó a tener límites que puedan servir de comparación. De todos modos se puede decir que la reducción en los límites máximos admitidos para este contaminante es la más acusada estando ahora en valores del 85% del valor inicial y se prevé una reducción que alcanza el 97% para el año 2008.

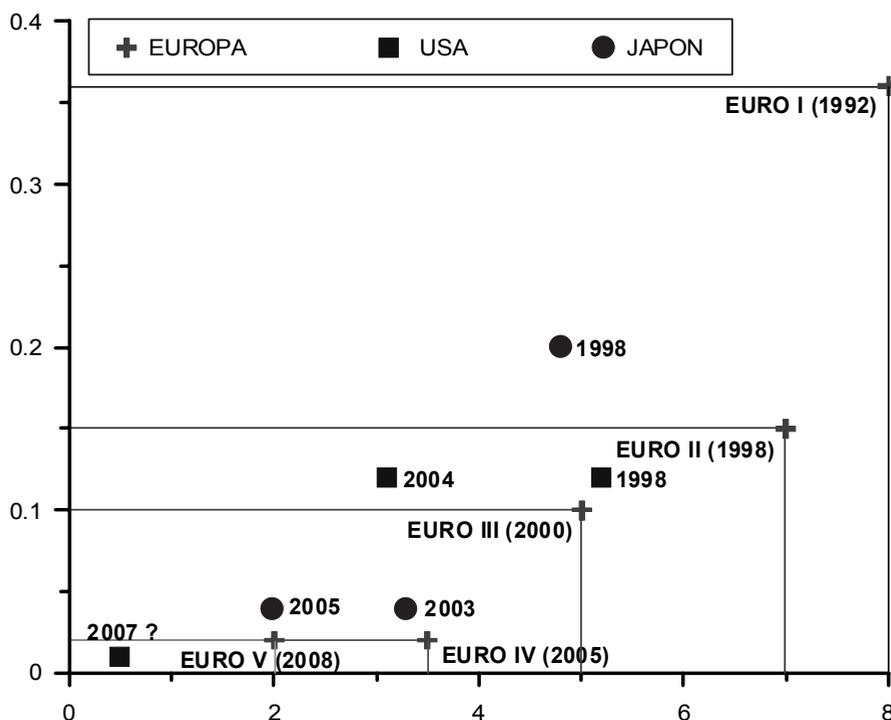


Figura 1.1 Evolución de los niveles máximos de emisión de NOx y partículas permitidos.

La figura 1 muestra una evolución histórica para Europa, Estados Unidos y Japón, de los límites máximos de las emisiones de óxidos de nitrógeno y partículas para motores de transporte pesados por carretera (HDDE). En la figura se indican con una cruz los límites de las sucesivas normativas Euro-

peas desde EURO I pasando por la vigente EURO III, hasta las aún no implementadas EURO IV y V. Adicionalmente se pueden ver en la figura los límites de las normativas japonesas (círculos) y de los Estados Unidos (cuadrados), con sus respectivos años de aplicación. Como puede observarse la tendencia de las tres legislaciones es más o menos similar y todas ellas convergen al punto de emisiones cero.

Las normativas además de establecer los límites máximos en las emisiones de escape también definen la forma en que el motor debe ser ensayado para su homologación definitiva. La normativa vigente EURO III establece como método de ensayo el ESC (*European Stationary Cycle*) que consiste en la realización de ensayos en trece condiciones de funcionamiento, de ahí su denominación más coloquial de ciclo “13 modos”. En la parte izquierda de la figura 1.2 se muestra la distribución de los trece modos en el mapa carga / régimen de giro del motor. Para cada modo de ensayo hay un número en porcentaje que indica el peso relativo que cada modo de operación tiene sobre el valor final. El reparto de las condiciones de operación se realiza sobre cuatro grados de carga (25, 50, 75 y 100%) y tres regímenes de giro que varían con el motor ensayado. El ciclo se completa con el ralentí.

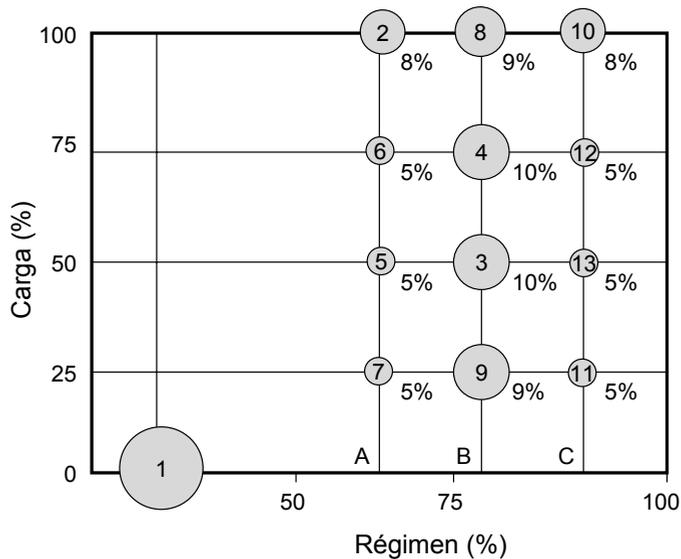


Figura 1.2 Ciclo ESC, normativa EURO III.

Adicionalmente al ESC la normativa EURO III estipula un ensayo en modo continuo ELR (*European Load Response*, figura 1.3) que solo es utilizado para la medida de humos (opacidad).

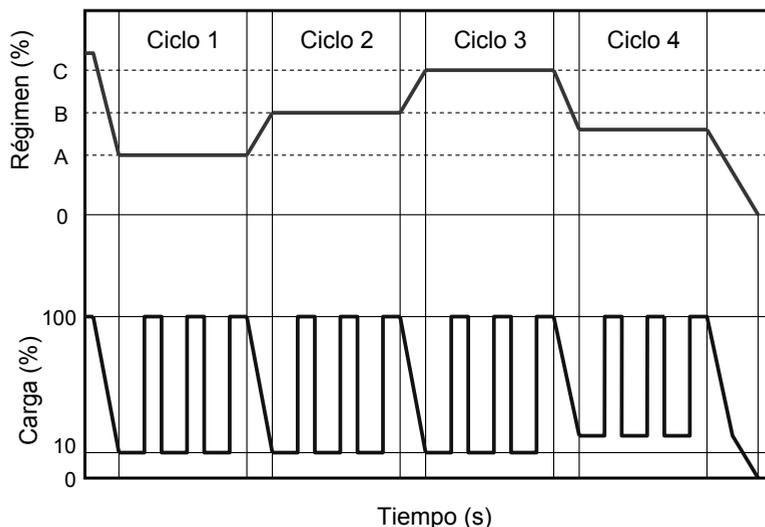


Figura 1.3 Ciclo ELR, normativa EURO III.

Existe un nuevo ciclo denominado ETC (*European Transient Cycle*) que consiste en la realización de un ensayo en continuo pasando por diferentes condiciones de funcionamiento, que representan el uso de este tipo de motores en ciudad, en carretera y en autopistas. Este ciclo será de aplicación obligatoria para las normativas futuras, EURO IV y V, como complemento a los ciclos ESC y ELR. La normativa establece que los fabricantes pueden optar entre el ciclo ESC o el ETC para homologación de nuevos vehículos con EURO III.

Existen características generales en este tipo de motor que han permanecido prácticamente inalteradas en los últimos 10 años. Por ejemplo, son motores de inyección directa con relaciones de compresión alrededor de 16:1. Son motores turbo-sobrealimentados con refrigeración del aire de admisión (*intercooler*) y prácticamente sin excepción utilizan cuatro válvulas por cilindro. La cámara de combustión labrada en el pistón es del tipo “tranquilo”, es decir con un diámetro de cámara amplio y una profundidad de cámara reducida.

Sin embargo, existen otras características y parámetros operativos que han evolucionado de forma muy importante en estos años. Probablemente un pilar fundamental para el correcto funcionamiento de este tipo de motor es el sistema de inyección. Actualmente se emplean tres tipos de sistemas: el más clásico basado en bomba en línea, el sistema basado en inyector bomba y últimamente también el sistema de inyección a presión constante conocido como “*Common Rail*”. Las tres grandes líneas maestras que pueden observarse en la evolución en lo referente al sistema de inyección son, sin duda, el incremento de las presiones máximas de inyección, la reducción de los diámetros de las toberas de inyección y la búsqueda de leyes de inyección cada vez más flexibles, que por medio de una gestión electrónica cada vez más sofisticada permiten adecuar la estrategia de inyección a cada condición operativa. La gestión electrónica de la inyección se complementa con la gestión electrónica de los trasvases de masa del motor gracias a tecnologías emergentes como son la recirculación de gases de escape, las turbinas de escape de geometría variable, etc., que junto con una progresión en el rendimiento de los sistemas de sobrealimentación han propiciado un incremento gradual de la presión de soplado.

Si analizamos la evolución de la tecnología en este campo y comparamos un motor de transporte pesado por carretera con especificaciones de hace una década (EURO I) con un motor con especificaciones actuales (EURO III), la presión máxima de inyección se ha multiplicado por un factor entre dos y tres, el área efectiva de las toberas se ha reducido en un factor de tres, mientras que la presión de soplado, y por tanto la densidad del aire en el cilindro, se ha multiplicado por un factor de dos. Todos estos parámetros, como veremos a lo largo del libro, son fundamentales para realizar un proceso de combustión que mantenga, o incluso reduzca, el consumo específico de estos motores, y simultáneamente permita cumplir las directivas de emisiones futuras.

1.2 Planteamiento del trabajo

La investigación se ha planteado con el objetivo de profundizar en el conocimiento y comprensión de los fenómenos relevantes en el proceso de combustión de un motor Diesel de transporte pesado por carretera. El proceso de combustión que tiene lugar en un motor Diesel es, por una parte, fundamental para obtener un motor eficiente y con una agresión medioambiental mínima y controlada. Por otra parte, a pesar del enorme esfuerzo realizado por

técnicos e investigadores en los últimos años, sigue siendo un proceso poco conocido y esquivo tanto a la formulación conceptual como a las técnicas experimentales de diagnóstico.

El control de emisiones contaminantes se puede realizar o bien en origen, es decir evitando con un buen diseño del proceso de combustión la formación de estos, o bien, alternativamente o en forma combinada mediante el uso de sistemas de postratamiento, ya sea para actuar sobre las emisiones de óxidos de nitrógeno o de partículas. Las estrategias de postratamiento, que abren nuevas posibilidades al desarrollo de este tipo de motores [2][3] quedan fuera de los objetivos que se plantean en este trabajo, que se centra en los procesos que ocurren dentro del cilindro. Por lo tanto los resultados y conclusiones van dirigidos a reducir las emisiones en origen.

El proceso de inyección / interacción con el aire / combustión ocurre en tiempos muy cortos (del orden de milisegundos) con velocidades características muy altas (varios cientos de metros por segundo). El combustible se inyecta por toberas muy pequeñas (décimas de milímetro). La atomización del combustible es muy eficaz, lo que produce gotas de pequeño tamaño (pocas decenas de micras) y con densidades de gotas muy altas (millones de gotas por cm^3). Adicionalmente la presión en cámara alcanza los ciento sesenta bar y las temperaturas locales máximas pueden alcanzar los tres mil Kelvin. Con estas condiciones de contorno no es difícil comprender las enormes dificultades que se plantean en el estudio del proceso de combustión en condiciones reales del motor Diesel, tanto desde el punto de vista experimental como desde la vertiente más conceptual o teórica.

Los objetivos que se plantean no aspiran a la completa resolución del problema, pero sí a ser una contribución, modesta por otra parte, desde varios puntos de vista. En primer lugar generando una base de datos experimental en condiciones controladas sobre un motor monocilíndrico en el que tanto los parámetros geométricos como operativos son representativos de la tecnología actual para el tipo de motor considerado. En segundo lugar la utilización de diferentes herramientas experimentales de forma concurrente, para ampliar al máximo la capacidad de diagnóstico experimental, sin alterar en lo esencial la geometría y el funcionamiento del motor. Y en tercer lugar tratar de analizar la información experimental obtenida a la luz de modelos conceptuales de los procesos de inyección / combustión / formación de emisiones, más o menos elaborados, que permitan por una parte validar los modelos y por otra generalizar las relaciones causa – efecto observadas experimentalmente.

Entre los objetivos inmediatos no se contempla la optimización del motor, ni lograr que las emisiones contaminantes sean compatibles con ninguna normativa. Si en los capítulos próximos se comparan las emisiones con las actuales EURO III o futuras EURO IV no es más que para establecer un marco de referencia realista.

En el apartado siguiente se describe de forma más detallada la metodología utilizada, así como los parámetros operativos de motor que se han considerado en el estudio paramétrico.

1.3 Metodología

La metodología seguida es eminentemente empírica y se basa en un estudio paramétrico experimental en el que se han modificado en un rango amplio las condiciones de operación del motor tal como se describe en cada uno de los capítulos dedicados a la presentación y análisis de los resultados obtenidos. Además del régimen de giro y del grado de carga, que definen el punto de operación del motor dentro de su mapa de actuación, se han considerado el inicio de inyección (SOI), la presión de inyección (PI), la tasa de recirculación de gases de escape (EGR) y la presión de soplado (PA). También se ha considerado el efecto que tienen sobre las actuaciones del motor distintas estrategias en la ley de entrega del combustible, concretamente se han evaluado los casos de pre-inyección o inyección piloto y post-inyección.

Para cada punto de operación del motor se han considerado como parámetros de salida o prestaciones del motor los siguientes:

- **Rendimiento del motor.** El rendimiento se cuantifica a través del consumo específico efectivo de combustible (G_e), que para un tipo de combustible dado es inversamente proporcional al anterior.
- **Emisiones contaminantes.** Según la normativa actual sobre límite de emisiones para motores que equipan a vehículos de transporte pesado por carretera, los compuestos limitados son el monóxido de carbono (CO), los hidrocarburos sin quemar (THC), los óxidos de nitrógeno (NOx) y las partículas (PM), como ya se señaló previamente. Con la tecnología actual son los dos últimos los que realmente plantean problemas para su control, por lo que fundamentalmente en lo que sigue se hará referencia a ellos. Únicamente en

los casos en los que el CO y los THC adquieran relevancia, también se considerarán y analizarán las emisiones de estos compuestos.

Los parámetros de salida considerados no son necesariamente concurrentes y en general la mejora observada en alguno de ellos al modificar los parámetros de operación lleva al deterioro de algún otro. En cada caso se han considerado, utilizando la nomenclatura inglesa, las curvas de “*trade-off*” de los parámetros de salida más relevantes. Estas curvas de *trade-off*, representan la evolución del consumo específico de combustible y las emisiones de PM y NO_x al modificar las condiciones operativas del motor. Para cada estudio paramétrico se puede obtener una “optimización” de los puntos de operación del motor tomando como función de referencia el cumplimiento de los límites impuestos por la normativa EURO III en lo referente a emisiones contaminantes con el mayor rendimiento posible. Este tipo de análisis tiene sin duda interés desde el punto de vista de la búsqueda de reglajes optimizados del motor, pero no permite profundizar directamente en las relaciones causa-efecto que controlan las prestaciones del motor.

Una segunda vía de análisis utilizada es el estudio de la sensibilidad de las prestaciones del motor a los parámetros de operación. Esta segunda vía de análisis ofrece, por una parte, un bagaje de información de tipo más práctico que, junto con la optimización antes descrita, permite conceptualizar las rutinas de búsqueda de reglajes optimizados desde el punto de vista más físico y no como una mera búsqueda de mínimos con criterios estrictamente matemáticos. Por otra parte, los estudios de sensibilidad de las prestaciones del motor ante modificaciones de los parámetros, junto con la tercera vía que se describe a continuación, pueden ayudar a comprender mejor los procesos físico-químicos que controlan las prestaciones y las emisiones del motor.

A partir de la medida de presión en el cilindro y las condiciones de operación del motor se realiza un diagnóstico del proceso de combustión obteniéndose parámetros tales como evolución y valor pico de la presión, evolución y valor pico de la temperatura, fracción de combustible quemada en premezcla y fracción quemada por difusión, duración de la combustión, temperatura de quemados, etc. La obtención sistemática de todos estos parámetros permite manejar información y magnitudes físicas más próximas al resultado final, es decir el rendimiento del motor y la emisión de contaminantes. Esto abre dos nuevas vías de análisis, en primer lugar la forma en que las condiciones de operación del motor afectan al proceso de combustión y en segundo lugar que relación existe entre los parámetros del proceso de combustión y las prestaciones del motor.

Finalmente, cuando sirva para arrojar más luz sobre el problema, se emplearán modelos conceptuales del proceso de combustión de chorros de combustible en motores Diesel y modelos de formación y destrucción de los distintos compuestos contaminantes estudiados.

El esquema de la metodología planteada está representado esquemáticamente en la figura 1.4. Al modificar los parámetros de operación cuya influencia sobre el motor pretende estudiarse, se modifican las actuaciones del motor. Experimentalmente pueden obtenerse las prestaciones, las emisiones y la presión en cámara. La información bruta obtenida con estos tres métodos se puede procesar y de esta forma obtener las curvas de *trade-off* antes mencionadas, el diagnóstico experimental del proceso de combustión al realizar un análisis del primer principio de la termodinámica, y la sensibilidad que presentan las actuaciones del motor ante la variación de los parámetros de entrada.

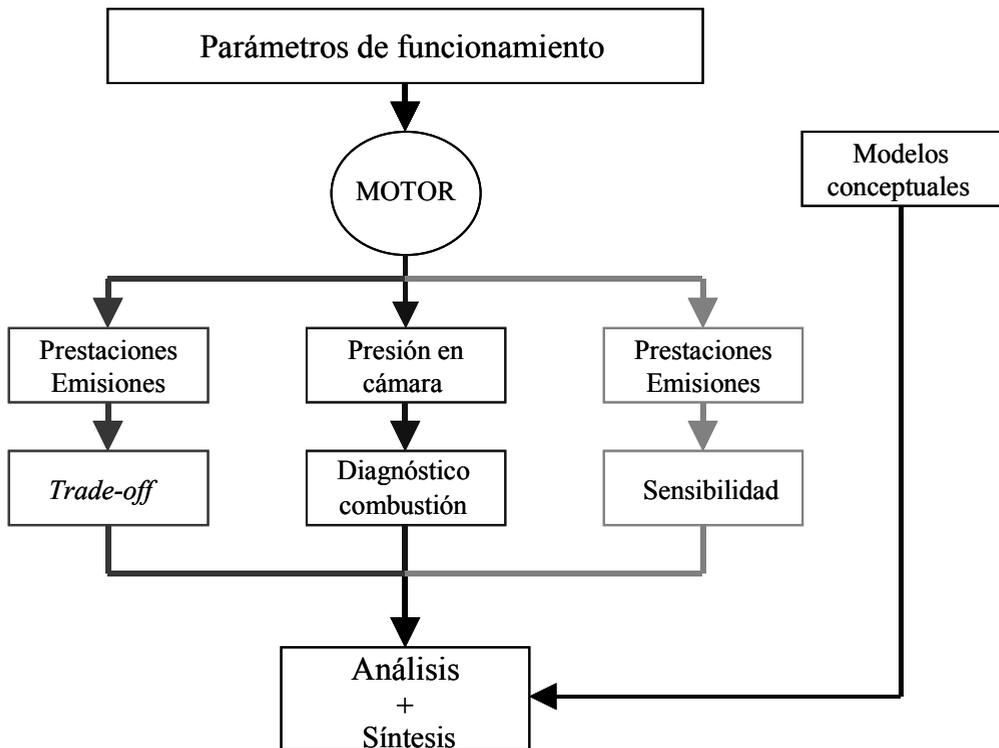


Figura 1.4 Esquema de la metodología utilizada en este libro.

Con toda la información obtenida y las distintas vías o formas de representar e interpretar la información experimental disponible, junto con razonamientos de corte más teórico a la luz de modelos conceptuales como los que se describen en el apartado 1.5 y en el capítulo 3, se intenta al final hacer una síntesis que permita, en sintonía con el objetivo de este trabajo, avanzar en la comprensión y conceptualización de los fenómenos físico-químicos que son relevantes en el proceso de combustión de los motores Diesel de transporte pesado por carretera.

1.4 Contenido del libro

Intentando dar respuesta a los objetivos planteados y siguiendo la metodología general descrita en el apartado anterior el contenido del libro se ha estructurado de la siguiente forma:

En el capítulo 1 se recogen las ideas introductorias, se definen los objetivos generales del trabajo así como la metodología empleada y se describe un modelo conceptual del proceso de inyección-combustión, que se aceptará como representativo del proceso de un motor Diesel HDDE, y que sirve como referencia conceptual a los análisis que se realizan a lo largo del libro.

En el capítulo 2 se describen las instalaciones y equipos experimentales que se han empleado para la obtención de todos los resultados experimentales y las distintas metodologías y rutinas empleadas para ello.

En el capítulo 3 se describen las herramientas teóricas que se han utilizado de forma complementaria al trabajo experimental. Se dedica una buena parte del capítulo al modelo de diagnóstico de la combustión empleado y los parámetros que pueden obtenerse de este análisis sobre la base del primer principio. En una segunda parte se describe un modelo para el cálculo de la temperatura de los productos de la combustión a partir del modelo de diagnóstico. En la última parte se describen los modelos de formación de emisiones que se han empleado en los razonamientos desarrollados en los capítulos que siguen a este.

Los capítulos 4, 5 y 6 se dedican a los tres estudios paramétricos considerados. Estos tres capítulos, que componen el núcleo del libro, tienen una estructura similar a la ya esbozada al plantear la metodología general.

El capítulo 4 describe y analiza los resultados obtenidos en motor al modificar la presión de inyección y el ángulo de inicio de la inyección. Previo a la presentación de los resultados se ha hecho un análisis de cómo los parámetros estudiados influyen sobre las características principales del chorro de combustible y su interacción con el aire. A este estudio se le ha llamado estudio paramétrico I.

El capítulo 5 aborda el estudio paramétrico II. En este estudio se han considerado dos estrategias diferentes de inyección partida. En la primera parte del capítulo se discuten los resultados obtenidos con la estrategia de pre-inyección, mientras que la segunda parte del capítulo está dedicada a la estrategia de post-inyección. Los parámetros estudiados en este capítulo han sido la cantidad de combustible inyectada en pre o post-inyección y la separación angular entre ambas inyecciones.

El capítulo 6 recoge y analiza todos los resultados experimentales obtenidos al modificar la presión de admisión del motor, y por tanto la masa de aire admitida, y la cantidad de gases de escape recirculados (EGR). Los resultados obtenidos se complementan con un análisis de la influencia del EGR sobre la masa admitida.

Finalmente, el capítulo 7 se hace una síntesis del trabajo y se proponen futuros líneas de investigación, que podrían desarrollarse a partir de la labor realizada.

1.5 Modelo conceptual del proceso de inyección - combustión

El proceso de inyección-combustión en motores Diesel es un proceso extraordinariamente complejo, como ya se ha anticipado en el apartado 1.2, por la cantidad de procesos individuales que intervienen y las interdependencias que tienen lugar entre ellos. En muchos aspectos sigue siendo absolutamente opaco a la formalización a la luz de los principios básicos de la física, lo que provoca un retraso en el modelado eficaz de estos procesos y por tanto en la predicción fiable de las actuaciones del motor.

A pesar de esta falta de conocimiento necesario para establecer un modelo conceptual fiable y universal, existe mucha información experimental, obtenida con técnicas ópticas cada vez más sofisticadas que permite al menos