



TEMAS AVANZADOS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

F. Payri/J.M^a. Desantes

DIAGNÓSTICO DE LA COMBUSTIÓN EN MOTORES DIESEL DE INYECCIÓN DIRECTA

CTA
motores térmicos



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

JAIME MARTÍN

EDITORIAL REVERTÉ

TEMAS AVANZADOS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

F. Payri/J.M^a. Desantes

DIAGNÓSTICO DE LA COMBUSTIÓN EN MOTORES DIESEL DE INYECCIÓN DIRECTA

JAIME MARTÍN

Dr. Ingeniero Industrial

Profesor Contratado Doctor

CMT - Motores Térmicos

Universidad Politécnica de Valencia



UNIVERSITAT
POLITÀCNICA
DE VALÈNCIA



EDITORIAL REVERTÉ S.A.
www.reverte.com

Directores de la Serie

Francisco Payri González

Dr. Ingeniero Industrial

José María Desantes Fernández

Dr. Ingeniero Industrial

Catedráticos de Universidad

CMT – Motores Térmicos

Universidad Politécnica de Valencia

Diagnóstico de la combustión en motores Diesel de inyección directa

Copyright © J. Martín

Edición en e-book:

© Editorial Reverté. S.A., 2015

ISBN 978-84-291-9330-5

Edición en papel:

© Editorial Reverté. S.A., 2012

ISBN: 978-84-291-4717-9

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 resultado de la actividad investigadora del grupo CMT-Motores Térmicos en el campo de la combustión en motores de combustión interna alternativos. El trabajo está encaminado a profundizar en el diagnóstico de la combustión a partir de la señal de presión en los motores Diesel de inyección directa, centrándose en la mejora de la precisión y robustez del cálculo de las condiciones termodinámicas en la cámara y la transmisión de calor a las paredes, redundando así en la mejora del cálculo de la ley de liberación de calor y de la caracterización de la combustión.

Partiendo de un esquema general del proceso de diagnóstico, se han identificado las incertidumbres más importantes. En este punto, el trabajo se ha orientado, por un lado, al desarrollo de un procedimiento fiable de ajuste de incertidumbres y por otro, a la mejora de los diferentes submodelos de cálculo, priorizando los aspectos más críticos. Esto ha llevado a implementar un procedimiento de caracterización del motor basado en ensayos sin combustión y a la realización de aportaciones relativas al tratamiento de la señal de presión, la estimación de las condiciones al cierre de la admisión y la transmisión de calor a las paredes de la cámara. Para ello se ha hecho uso de las herramientas experimentales, teóricas y de cálculo más apropiadas en cada caso, entre las que cabe destacar la medida de la temperatura de paredes de la cámara, el cálculo CFD o el modelado unidimensional de la dinámica de gases.

Finalmente quisiéramos hacer una breve reseña del autor de este trabajo. En la actualidad imparte docencia como Profesor Contratado Doctor y desarrolla su actividad investigadora en CMT-Motores Térmicos en la Universidad Politécnica de Valencia. Su labor investigadora se centra en el diagnóstico de la combustión a partir de la señal de presión en motores de combustión interna alternativos, campo en el que ha participado en diversos proyectos de I+D y en el que posee diversas publicaciones en revistas y congresos internacionales.

Francisco Payri
Catedrático de Universidad
CMT - Motores Térmicos, UPV

Santiago Molina
Profesor Titular de Universidad
CMT - Motores Térmicos, UPV

Índice general

| | |
|---|---------------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Justificación y antecedentes | 1 |
| 1.2. Objetivos | 5 |
| 1.3. Metodología | 6 |
| Bibliografía | 9 |
| 2. Diagnóstico de la combustión a partir de la presión | 11 |
| 2.1. Introducción | 12 |
| 2.2. Parámetros del motor-instalación | 18 |
| 2.2.1. Relación de compresión | 18 |
| 2.2.2. Deformaciones mecánicas | 20 |
| 2.2.3. Desfase presión-volumen | 20 |
| 2.2.4. Transmisión de calor | 25 |
| 2.2.5. Coeficiente de torbellino medio | 29 |
| 2.3. Señales instantáneas | 33 |
| 2.3.1. Presión instantánea | 34 |
| 2.3.2. Tasa de inyección | 46 |
| 2.4. Variables medias | 49 |
| 2.4.1. Variables de control | 49 |
| 2.4.2. Variables de medida | 53 |
| 2.5. Modelo termodinámico de diagnóstico | 54 |
| 2.5.1. Cálculo del volumen instantáneo | 58 |

| | |
|--|-----------|
| 2.5.2. Cálculo de la transmisión de calor | 60 |
| 2.5.3. Balance másico y propiedades termodinámicas | 64 |
| 2.5.4. Balance energético | 66 |
| Bibliografía | 72 |
| 3. Sensibilidad del diagnóstico de la combustión | 83 |
| 3.1. Introducción | 85 |
| 3.2. Estudio de sensibilidad en combustión | 86 |
| 3.2.1. Metodología del estudio | 86 |
| 3.2.2. Definición del ensayo de referencia | 90 |
| 3.2.3. Definición de los parámetros de entrada | 92 |
| 3.2.3.1. Variables medias | 92 |
| 3.2.3.2. Parámetros ajustados | 95 |
| 3.2.3.3. Otras incertidumbres | 97 |
| 3.2.4. Definición de los parámetros de salida | 100 |
| 3.2.5. Resultados | 102 |
| 3.2.5.1. Influencia de la masa de aire | 104 |
| 3.2.5.2. Influencia de la masa de EGR | 105 |
| 3.2.5.3. Influencia de la masa de combustible | 106 |
| 3.2.5.4. Influencia de la masa de <i>blow-by</i> | 106 |
| 3.2.5.5. Influencia de la relación de compresión | 107 |
| 3.2.5.6. Influencia del coeficiente de deformaciones | 108 |
| 3.2.5.7. Influencia del <i>desfase</i> | 108 |
| 3.2.5.8. Influencia del coeficiente de película | 109 |
| 3.2.5.9. Influencia de la presión de referencia | 109 |
| 3.2.5.10. Influencia de K_{cap} | 110 |
| 3.2.5.11. Influencia de las temperaturas de paredes | 110 |
| 3.2.5.12. Errores máximos | 111 |
| 3.2.5.13. Influencia de la ausencia de tasa de inyección | 113 |

| | |
|--|-----|
| 3.2.6. Validación del estudio | 114 |
| 3.2.7. Conclusiones | 119 |
| 3.3. Estudio de sensibilidad en arrastre | 122 |
| 3.3.1. Metodología del estudio | 123 |
| 3.3.2. Definición de los parámetros de entrada | 125 |
| 3.3.3. Definición de los parámetros de salida | 126 |
| 3.3.3.1. Calor transmitido a las paredes | 127 |
| 3.3.3.2. Calor liberado | 130 |
| 3.3.4. Resultados | 132 |
| 3.3.4.1. Influencia de la masa de aire | 132 |
| 3.3.4.2. Influencia de la masa de EGR | 135 |
| 3.3.4.3. Influencia de la masa de <i>blow-by</i> | 137 |
| 3.3.4.4. Influencia de la relación de compresión | 139 |
| 3.3.4.5. Influencia del coeficiente de deformaciones | 142 |
| 3.3.4.6. Influencia del <i>desfase</i> | 144 |
| 3.3.4.7. Influencia del coeficiente de película | 148 |
| 3.3.4.8. Influencia de la presión de referencia | 148 |
| 3.3.4.9. Influencia de K_{cap} | 152 |
| 3.3.4.10. Influencia de las temperaturas de paredes | 155 |
| 3.3.4.11. Consideraciones finales | 157 |
| 3.3.5. Conclusiones | 159 |
| 3.A. Apéndice: curvas experimentales y ajustadas en el motor HDDE-1.85 | 164 |
| 3.B. Apéndice: rangos de variación de las temperaturas de paredes en el motor HDDE-1.85 | 167 |
| 3.C. Apéndice: variaciones de los parámetros de salida en el motor HDDE-1.85 | 168 |
| 3.C.1. Variaciones relativas | 169 |
| 3.C.2. Incertidumbres máximas | 172 |
| Bibliografía | 175 |

| | |
|---|------------|
| 4. Optimización del proceso de diagnóstico de la combustión | 177 |
| 4.1. Introducción | 178 |
| 4.2. Tratamiento de la señal de presión | 179 |
| 4.2.0.1. Promediado de la señal de presión | 180 |
| 4.2.0.2. Filtrado de la señal de presión | 188 |
| 4.2.0.3. Derivada de la señal de presión | 193 |
| 4.2.0.4. Conclusiones | 196 |
| 4.3. Estimación de la masa atrapada | 198 |
| 4.3.1. Estimación de la masa atrapada | 198 |
| 4.3.1.1. Descripción del modelo | 201 |
| 4.3.1.2. Ajuste de las secciones de las restricciones | 206 |
| 4.3.1.3. Puesta a punto del modelo y resultados | 207 |
| 4.3.1.4. Conclusiones | 220 |
| 4.3.2. Detección de errores en la estimación de m_{RCA} y p_{ref} | 221 |
| 4.3.2.1. Estimación de la temperatura al RCA | 225 |
| 4.3.2.2. Conclusiones | 234 |
| 4.4. Cálculo de la transmisión de calor | 235 |
| 4.4.1. Cálculo del coeficiente de película | 236 |
| 4.4.1.1. Herramientas teóricas y experimentales | 236 |
| 4.4.1.2. Cálculo de K_{CTM} | 239 |
| 4.4.1.3. Cálculo de la velocidad del gas debido al <i>swirl</i> | 240 |
| 4.4.1.4. Cálculo de r_W | 244 |
| 4.4.1.5. Ajuste del término de combustión | 247 |
| 4.4.1.6. Conclusiones | 250 |
| 4.4.2. Cálculo de las temperaturas de paredes | 252 |
| 4.4.2.1. Conclusiones | 254 |
| 4.5. Caracterización del motor-instalación | 256 |
| 4.5.1. Determinación de las incertidumbres a ajustar | 257 |
| 4.5.2. Procedimiento de ajuste de incertidumbres | 261 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 4.5.2.1. | Valores iniciales | 263 |
| 4.5.2.2. | Ajuste del nivel de presión | 266 |
| 4.5.2.3. | Ajuste de C_{W1} , C_{W2} y cálculo de $\Delta\alpha_t$ | 268 |
| 4.5.2.4. | Cálculo de la masa atrapada al RCA y c_{bb} | 269 |
| 4.5.2.5. | Ajuste de la relación de compresión | 270 |
| 4.5.2.6. | Ajuste de K_{def} | 271 |
| 4.5.3. | Proceso de Caracterización | 273 |
| 4.5.4. | Conclusiones | 282 |
| | Bibliografía | 283 |
| 5. | Resultados | 289 |
| 5.1. | Introducción | 289 |
| 5.2. | Ajuste de incertidumbres del motor-instalación | 290 |
| 5.3. | Diagnóstico de las combustiones | 292 |
| 5.4. | Otros casos | 299 |
| | Bibliografía | 304 |
| 6. | Conclusiones y trabajos futuros | 305 |
| 6.1. | Conclusiones | 305 |
| 6.1.1. | Conclusiones relativas a la identificación de los puntos débiles del proceso de diagnóstico | 306 |
| 6.1.2. | Conclusiones relativas al desarrollo de un procedimiento fiable para el ajuste de parámetros inciertos | 307 |
| 6.1.3. | Conclusiones relativas a la mejora del <i>modelo de diagnóstico de referencia</i> | 308 |
| 6.2. | Trabajos futuros | 310 |
| | Bibliografía | 312 |
| | Índice bibliográfico | 313 |

Tabla de símbolos

Latinos

| | | |
|------------------|---|----------------------|
| a | Velocidad del sonido | [m/s] |
| A | Sección | [m ²] |
| c_{bb} | Coefficiente de descarga experimental para el cálculo del gasto de <i>blow-by</i> | [-] |
| $c_{d,adm}$ | Coefficiente de descarga de las válvulas de admisión | [-] |
| $c_{d,esc}$ | Coefficiente de descarga de las válvulas de escape | [-] |
| c_m | Velocidad media del pistón | [m/s] |
| c_p | Calor específico a presión constante | [J/kg K] |
| c_v | Calor específico a volumen constante | [J/kg K] |
| C_{W1}, C_{W2} | Constantes de la ecuación de transmisión de calor de Woschni | [-] |
| d_{comb} | Duración de la combustión | [°] o [s] |
| D | Diámetro del cilindro | [m] |
| D_{bowl} | Diámetro del <i>bowl</i> | [m] |
| F_e | Proporción másica combustible-aire estequiométrica | [-] |
| F_r | Dosado relativo | [-] |
| h | Coefficiente de película gas-pared | [W/m ² K] |
| h | Entalpía específica | [J/kg] |
| h_{comb} | Poder calorífico inferior del combustible | [J/kg] |
| h_f^o | Entalpía de formación del combustible a 298 K y 1 atm | [J/kg] |
| k | Conductividad térmica | [W/m K] |
| K | Conductancia térmica | [W/K] |
| K_{cap} | Coefficiente de calibración del captador | [-] |

| | | |
|------------|---|------------------------------|
| K_{CTM} | Coficiente de conservación del momento angular del torbellino | [-] |
| K_{def} | Coficiente de deformaciones | [-] |
| L_b | Longitud de la biela | [m] |
| L_m | Longitud de la manivela | [m] |
| m | Masa | [kg] |
| \dot{m} | Gasto másico | [kg/s] |
| M | Número de muestras total adquiridas | [-] |
| n | Exponente politrópico | [-] |
| n_c | Número de ciclos de presión consecutivos adquiridos | [-] |
| n_{pc} | Número de muestras adquiridas en cada ciclo de presión | [-] |
| N | Régimen del motor | [rpm] |
| p | Presión | [Pa] |
| P | Potencia | [W] |
| P_{bowl} | Profundidad del <i>bowl</i> | [m] |
| Q | Calor transmitido a las paredes de motor | [J], [W], [J/°] o [J/rad] |
| R | Constante específica de los gases | [J/kg K] |
| r_c | Relación de compresión | [-] |
| $r_{c,d}$ | Relación de compresión dinámica | [-] |
| r_W | Cociente entre las constantes C_{W1} y C_{W2} de la ecuación de Woschni | [-] |
| s | Entropía específica | [J/kg K] |
| S | Carrera | [m] |
| t | Tiempo | [s] |
| T | Temperatura | [K] |
| u | Energía interna específica | [J/kg] |
| V | Volumen | [m ³] |
| V_d | Volumen desplazado | [m ³] |
| Y | Fracción másica | [-] |
| z | Número de cilindros | [-] |

Griegos

| | | |
|-------------------|--|----------------------|
| α | Ángulo de giro del cigüeñal | [°] |
| α_{tot} | Ángulo de desfase total | [°] |
| α_G | Ángulo de desfase geométrico | [°] |
| Δh_{vap} | Entalpía de vaporización del combustible | [J/kg] |
| $\Delta \alpha_t$ | Ángulo de desfase termodinámico | [°] |
| $\Delta \alpha_Q$ | Ángulo de desfase por pérdidas de calor | [°] |
| $\Delta \alpha_m$ | Ángulo de desfase por pérdidas de masa | [°] |
| η | Rendimiento | [-] |
| γ | Cociente de calores específicos (exponente adiabático) | [-] |
| ρ | Densidad | [kg/m ³] |
| ω_M | Velocidad angular de giro del motor | [rad/s] |
| ω_T | Velocidad angular de giro del torbellino | [rad/s] |
| $\tau_{retraso}$ | Tiempo de retraso | [s] |
| τ_{vap} | Tiempo de evaporación | [s] |

Subíndices y superíndices

| | |
|----------|---|
| a | Relativo al aire |
| a, q | Relativo al aire quemado estequiométricamente |
| adm | Relativo a la admisión |
| amb | Relativo a las condiciones ambientales |
| bb | Relativo al <i>blow-by</i> |
| $bowl$ | Relativo al <i>bowl</i> |
| c | Relativo a la carga del cilindro |
| $carter$ | Relativo al cárter |
| CA | Relativo al ciclo abierto |
| cc | Relativo al cortocircuito |
| cc | Relativo a la cámara de combustión |
| CC | Relativo a ciclo cerrado |
| cil | Relativo al cilindro |
| $comb$ | Relativo a la combustión |
| cul | Relativo a la culata |

| | |
|------------|---|
| def | Relativo a las deformaciones |
| e | Relativo a los parámetros de entrada |
| EGR | Relativo a la recirculación de gases de escape (del inglés <i>Exhaust Gas Recirculation</i>) |
| esc | Relativo al escape |
| f | Relativo al combustible |
| f, ev | Relativo al combustible evaporado |
| f, g | Relativo al combustible gaseoso |
| f, l | Relativo al combustible líquido |
| f, iny | Relativo al combustible líquido en condiciones de inyección |
| f, q | Relativo al combustible quemado estequiométricamente |
| g | Relativo al gas |
| G_1, G_2 | Relativo a los puntos G (ver punto 3.3.4.6) |
| iny | Relativo a la inyección de combustible |
| max | Valor máximo |
| min | Valor mínimo |
| n | Relativo al exponente politrópico |
| oil | Relativo al aceite lubricante |
| O_2 | Relativo a la especie oxígeno |
| O_2, adm | Relativo a la especie oxígeno en admisión |
| O_2, a | Relativo a la especie oxígeno en el aire |
| p | Relativo a las paredes de la cámara (pistón, culata y cilindro) |
| pil | Relativo a la inyección piloto |
| pis | Relativo al pistón |
| $prin$ | Relativo a la inyección principal |
| q | Relativo a los productos de la combustión estequiométrica |
| r | Relativo al líquido refrigerante |
| ref | Valor de referencia |
| res | Relativo a los gases residuales |
| s | Relativo a los parámetros de salida |
| v | Relativo a las válvulas |
| vap | Relativo a la vaporización |
| W | Relativo al modelo de transmisión de calor de Woschni |

Siglas

| | | |
|--------------|---|-------|
| AAE | Adelanto de la Apertura de la(s) válvula(s) de Escape | [°] |
| A/D | Relativo a la conversión Analógico-Digital de señales | |
| CDG_{comb} | Centro De Gravedad de la combustión | [°] |
| CFD | Dinámica de fluidos computacional (del inglés <i>Computational Fluid Dynamics</i>) | |
| CTM | Coefficiente de Torbellino Medio | [-] |
| ECU | Unidad de control electrónica (del inglés <i>Electronic Control Unit</i>) | |
| EGR | Recirculación de gases de escape (del inglés <i>Exhaust Gas Recirculation</i>) | |
| EOI | Final de la inyección (del inglés <i>End Of Injection</i>) | [°] |
| ET | Duración del comando de control de la inyección (del inglés <i>Energizing Time</i>) | [ms] |
| DI | Inyección directa (del inglés <i>Direct Injection</i>) | |
| dFQL | Tasa de calor liberado | [J/°] |
| FQL | Calor liberado acumulado | [J] |
| FFT | Transformada rápida de Fourier (del inglés <i>Fast Fourier Transform</i>) | |
| FMQ | Fracción de Masa Quemada | [-] |
| HCCI | Motor de encendido por compresión con carga homogénea (del inglés <i>Homogeneous Charge Compression Ignition</i>) | |
| HDDE | Motor de gran cilindrada utilizado en vehículos de transporte de mercancías (del inglés <i>Heavy Duty Diesel Engine</i>) | |
| HSDE | Motor de pequeña cilindrada utilizado en automoción para turismos (del inglés <i>High Speed Diesel Engine</i>) | |
| IFFT | Transformada rápida de Fourier inversa (del inglés <i>Inverse Fast Fourier Transform</i>) | |
| MCIA | Motor de Combustión Interna Alternativo | |
| MEC | Motor de Encendido por Compresión | |
| MEP | Motor de Encendido Provocado | |
| pme | Presión Media Efectiva | [bar] |
| pmi | Presión Media Indicada | [bar] |

| | | |
|-----|--|-----|
| PMI | Punto Muerto Inferior. Localizado en $\alpha = \pm 180^\circ$ | [°] |
| PMS | Punto Muerto Superior. Localizado en $\alpha = 0^\circ$ | [°] |
| RCA | Retraso del Cierre de la(s) válvula(s) de Admisión | [°] |
| SOI | Inicio de la inyección (del inglés <i>Start Of Injection</i>) | [°] |
| SOC | Inicio de la combustión (del inglés <i>Start Of Combustion</i>) | [°] |
| TGV | Turbina de Geometría Variable | |
| 1D | Modelado unidimensional de la dinámica de gases no estacionaria | |

Capítulo 1

Introducción

Índice

| | |
|---|---|
| 1.1. Justificación y antecedentes | 1 |
| 1.2. Objetivos | 5 |
| 1.3. Metodología | 6 |
| Bibliografía | 9 |

1.1. Justificación y antecedentes

En los últimos años los motores Diesel han evolucionado hasta convertirse en la alternativa más eficiente para aplicaciones de automoción. Este hecho se ve reflejado en el crecimiento continuo de las ventas de vehículos equipados con dicho motor. Esta evolución ha venido dada por varios factores:

- En primer lugar los avances en el control electrónico y los nuevos sistemas de inyección han permitido la incorporación de la inyección directa a motores Diesel cada vez más pequeños. Esto junto con las innovaciones en los sistemas de sobrealimentación, EGR, etc. han permitido una mejora espectacular respecto a los motores Diesel de hace apenas una década.
- La presión del mercado es cada vez más exigente con los fabricantes, obligándoles a producir vehículos con menor consumo y mayores prestaciones, fiabilidad y durabilidad.

- Por último, la regulación cada vez más estricta de los límites de emisiones, tal como muestra la figura 1.1, está llevando a producir vehículos que contaminan cada vez menos. De hecho, la reciente entrada en vigor de la normativa Euro IV y la próxima Euro V han fijado unos límites extremadamente bajos, difíciles de cumplir incluso mediante la combinación de la optimización de la estrategia de funcionamiento y elementos de postratamiento de los gases de escape.

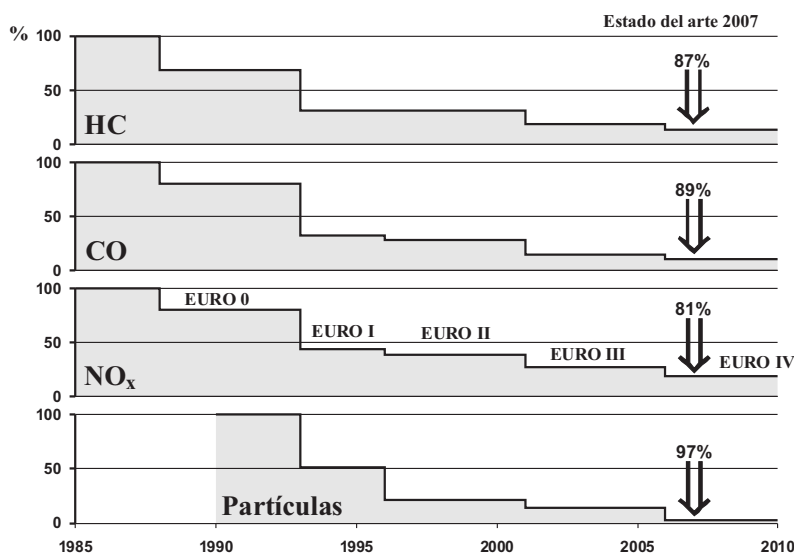


Figura 1.1. Evolución de la normativa europea sobre emisiones contaminantes.

Esta mejora de los motores Diesel pasa ineludiblemente por un buen conocimiento de los complejos procesos termofluidodinámicos implicados en la inyección-combustión. Con este objetivo se han venido desarrollando multitud de técnicas de perfil teórico, experimental y teórico-experimental que se describen en el capítulo 2.

Dentro de los métodos teóricos, las herramientas de cálculo numérico, cuya aplicación fundamental es el estudio de algún aspecto particular o fenómeno básico, se han visto beneficiadas por el incremento de la potencia de cálculo de los computadores. Los modelos fenomenológicos han apoyado su desarrollo por un lado en las herramientas de cálculo numérico y por otro en la mejora de la tecnología y técnicas experimentales, en particular a las técnicas ópticas.

Al plantear modelos teóricos que expliquen los fenómenos involucrados en la inyección-combustión, un paso fundamental es analizar como afectan diferentes reglajes a la forma en que se quema el combustible y su efecto en emisiones y prestaciones. Debido a la gran complejidad de los procesos implicados y a la enorme cantidad de parámetros de reglaje en el motor resulta muy difícil analizar las relaciones causa-efecto. El empleo de técnicas experimentales para la validación de planteamientos teóricos ha conducido al desarrollo de técnicas mixtas de perfil teórico-experimental, más conocidas como técnicas de diagnóstico, basadas en la “interpretación” de diferentes señales experimentales. Dentro de los modelos de diagnóstico, aquellos que se basan en la medida de la presión instantánea en la cámara para obtener la ley de liberación de calor, son especialmente adecuados para el estudio de la combustión. Dichos modelos aportan las siguientes ventajas:

- Permiten estudiar como afectan los cambios en los reglajes de motor a la evolución de parámetros físicos instantáneos como son la temperatura y densidad dentro de la cámara de combustión. Para ello sólo requieren una ecuación de estado, habitualmente la ecuación de los gases perfectos.
- La ley de liberación de calor (FQL) proporciona información precisa acerca de la evolución de la combustión y permite calcular parámetros como el inicio y duración de la combustión, tiempo de retraso, etc. que sirven para una correcta caracterización del proceso de combustión.
- El análisis de la relación entre los parámetros físicos instantáneos y la ley de liberación de calor permite establecer relaciones de causa-efecto útiles para comprender los fenómenos implicados. Dichas relaciones son de gran ayuda a la hora de implementar modelos predictivos como el de Fenollosa [1] o ayudar a analizar resultados de técnicas experimentales como hace García [2].
- Mediante el cálculo de los parámetros indicados se pueden establecer relaciones claras entre las condiciones de funcionamiento y las prestaciones del motor.
- Haciendo uso de un modelo de transmisión de calor como el propuesto por Woschni [3, 4], se puede calcular el flujo de calor a las paredes de la cámara de combustión a partir de la temperatura instantánea en el cilindro. Este flujo térmico, es necesario para la solución del primer principio en el cálculo de la liberación de calor, pero además proporciona información relevante para la caracterización térmica del motor.

A pesar de su innegable utilidad, los modelos termodinámicos de diagnóstico tienen algunos puntos débiles que constituyen su limitación fundamental:

1. Debido a su carácter teórico-experimental, utilizan como entradas señales experimentales instantáneas y variables medias:
 - La señal de presión es la señal instantánea imprescindible, pero suele ser habitual también disponer de la señal de tasa de inyección de combustible; en este caso se puede tener en cuenta la especie combustible en la composición instantánea de la cámara. Es necesario un procedimiento de tratamiento de las señales instantáneas para adecuarlas como entradas al modelo de diagnóstico.
 - Son necesarias las medidas de una serie de variables del punto de funcionamiento del motor que son “estables” durante el ensayo y que son medidas con una baja frecuencia de muestreo (habitualmente cada varios segundos). Una descripción detallada de estas variables medias se da en el apartado 2.4.

Las variables instantáneas presentan un cierto nivel de error asociado a las etapas de adquisición y tratamiento (apartado 2.3), análogamente las variables medias tienen cierta incertidumbre que depende de la variable y los equipos utilizados (apartado 2.4). Aunque los equipos de medida son cada vez más precisos, es imposible eliminar completamente cierto nivel de incertidumbre en las medidas experimentales. Además el tratamiento de las señales instantáneas puede repercutir en la calidad de los resultados.

2. La obtención de la ley de liberación de calor requiere el cálculo del primer principio de la termodinámica. Para ello se asumen hipótesis simplificadoras e incorporan diferentes submodelos para estimar los términos necesarios: flujo de calor, propiedades del gas en la cámara, masa instantánea en el cilindro, etc. Dichos submodelos no son perfectos en ningún caso y habitualmente requieren el ajuste experimental de constantes o parámetros. Algunos de estos parámetros son difíciles de medir experimentalmente y requieren su ajuste por métodos indirectos. Uno de los ejemplos más claros es la transmisión de calor a las paredes del cilindro que ha sido estudiada durante años pero aun en este momento sigue siendo una importante fuente de error como Lapuerta [5] y Tinaut [6] mostraron.

3. Por último hay parámetros geométricos (ver 2.2) característicos del motor-instalación que difícilmente pueden medirse, y cuyo error influye de forma nada despreciable en los resultados.

Debido a estas razones, los modelos de diagnóstico presentan cierto error en sus resultados por incertidumbres en las medidas, parámetros estimados y en los submodelos de cálculo.

El trabajo plasmado en este libro se enmarca dentro de la línea de investigación del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos sobre el diagnóstico de la combustión, en la que se realizaron los trabajos previos de:

- Macian [7], en 1984, que realiza un estudio de la dispersión cíclica en un MEP y propone un modelo termodinámico de dos zonas para el cálculo de la fracción de masa quemada.
- Tinaut [6], en 1986, que propone un modelo termodinámico de diagnóstico de la combustión para motores Diesel de inyección directa.
- Oliver [8], en 1991, que lleva a cabo un estudio del sistema de adquisición y tratamiento de datos en MCIA.
- Armas¹ [9], en 1998, que implementa un modelo de diagnóstico de la combustión en motores Diesel de inyección directa, proponiendo soluciones particulares para cada término que interviene en el cálculo de la ley de liberación de calor. Además, sienta las bases para el desarrollo de un procedimiento de ajuste de incertidumbres.

1.2. Objetivos

El objetivo general de este libro es contribuir a la mejora del proceso de diagnóstico de la combustión a partir de la señal de presión, tomando como punto de referencia el trabajo de Armas². Para ello se plantean los siguientes objetivos particulares:

¹Este trabajo de Armas es citado varias veces a lo largo de este libro; siempre que no se acompañe el nombre del autor con ninguna referencia se entenderá que es la [9].

²En el documento se hará referencia al modelo termodinámico de diagnóstico propuesto por Armas como el “*modelo de diagnóstico de referencia*”.

1. *Identificar los puntos débiles del proceso de diagnóstico de la combustión.* Partiendo de un esquema lo más general posible, se realizará un estudio para clasificar cualitativa y cuantitativamente la importancia de las incertidumbres asociadas a variables medidas, parámetros estimados o modelos de cálculo influyentes en el diagnóstico de la combustión.
2. *Desarrollar un procedimiento fiable para el ajuste de parámetros inciertos influyentes en el diagnóstico de la combustión.* Este objetivo se llevará a cabo en función de los resultados del trabajo asociado al objetivo anterior: se dará preferencia a aquellos parámetros más influyentes y en el caso que no sea posible su ajuste, se caracterizará su efecto en los resultados del modelo para que pueda ser identificado.
3. *Mejora del modelo de diagnóstico de referencia.* Para ello se revisará cada uno de sus submodelos y se propondrán mejoras que los hagan más robustos y precisos. Los esfuerzos mayores se centrarán en aquellos que se haya detectado que son los más críticos.

Aunque la consecución de estos objetivos llevará a la mejora de un modelo de diagnóstico en particular, se obtendrán conclusiones y se propondrán mejoras del diagnóstico de la combustión en general, cuyo campo de aplicación trascenderá al *modelo de diagnóstico de referencia*. Este mayor alcance se fundamenta en la metodología que se detalla en el punto siguiente y en que muchas de las incertidumbres que se analizarán son compartidas por la mayoría de modelos de diagnóstico.

1.3. Metodología

El esquema de la metodología seguida para el desarrollo de este trabajo se muestra en la figura 1.2.

Para empezar, se realiza en el capítulo 2 una revisión bibliográfica del estado del arte en cuanto al diagnóstico de la combustión a partir de la presión instantánea en cámara; presentándose un esquema general del procedimiento que será el punto de referencia para abordar los objetivos planteados en el apartado 1.2. Para ello se hará una descripción detallada de todas las etapas del diagnóstico, donde se explicitarán las variables y parámetros que intervienen, así como los submodelos y procedimientos necesarios.

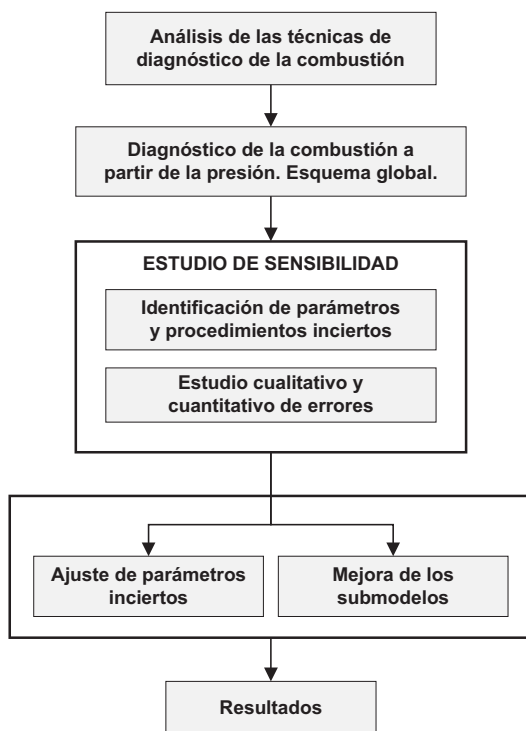


Figura 1.2. Esquema de la metodología.

En el capítulo 3 se identificarán los parámetros susceptibles de afectar de forma significativa a los resultados del diagnóstico de la combustión y se llevará a cabo un estudio de sensibilidad del *modelo de diagnóstico de referencia* ante variaciones de los parámetros seleccionados. Dicho estudio se dividirá en dos partes diferenciadas tanto en su objetivo como en el procedimiento seguido:

1. Primeramente se analizará con ensayos en combustión la influencia de las incertidumbres, con el fin de detectar cuales son los parámetros que influyen más cuantitativamente en los resultados. El objetivo es clasificar las incertidumbres por su importancia y estimar el valor de los errores máximos esperables en los resultados, dependiendo de la incertidumbre de entrada. También se analizarán los mecanismos causa-efecto que producen los errores en las salidas del modelo.

2. El estudio anterior proporciona valores numéricos de los errores pero no información acerca de como afecta el error en un parámetro de entrada a la evolución instantánea del ciclo termodinámico. Dicho análisis es mucho más sencillo de realizar con ensayos en arrastre³ en los que no existe liberación de calor. El estudio de sensibilidad en arrastre permitirá caracterizar la influencia de cada incertidumbre con el objetivo final de poder diferenciar comportamientos cualitativos en la evolución del ciclo termodinámico. De este modo se obtendrá la información necesaria para elaborar en la etapa posterior un procedimiento de ajuste de algunos de estos parámetros inciertos.

En el capítulo 4:

- Se aborda el tratamiento de la señal de presión con el fin de obtener un ciclo medio filtrado y una derivada, de la mejor calidad posible, como punto de partida del proceso de diagnóstico de la combustión.
- Se trata la mejora de los diferentes submodelos del *modelo de diagnóstico de referencia*, haciendo hincapié en aquellos que se haya detectado en el estudio de sensibilidad del capítulo 3 que son más importantes. Para ello se hará uso de las herramientas experimentales, teóricas y de cálculo más apropiadas en cada caso, como la medida de temperatura de paredes de la cámara, el cálculo CFD o el modelado unidimensional de la dinámica de gases no estacionaria (1D).
- Se propone un procedimiento de ajuste de algunos parámetros inciertos empleando ensayos con el motor arrastrado. Dicho procedimiento permitirá abordar el diagnóstico de la combustión habiendo acotado de forma razonable los errores producidos por algunas incertidumbres experimentales y parámetros.

En el capítulo 5 se presentan algunos resultados del modelo de diagnóstico con los cambios presentados en los capítulos anteriores, comparándolos con los del *modelo de diagnóstico de referencia*.

En el capítulo 6 se realiza una síntesis de los aspectos más importantes y se remarcan las conclusiones. Así mismo, se muestran los posibles trabajos futuros que pueden dar continuidad al trabajo presentado, incidiendo en aquellos aspectos que se haya concluido que deben ser abordados.

³Ver explicación en el apéndice al final del capítulo.

Bibliografía

- [1] Fenollosa C. *Aportación a la descripción fenomenológica del proceso de combustión por difusión Diesel*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003.
- [2] García J.M. *Aportaciones al estudio del proceso de combustión turbulenta de chorros en motores Diesel de inyección directa*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2004.
- [3] Woschni G. “A universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in the internal combustion engine”. *SAE Paper 670931*, 1967.
- [4] Woschni G. “Die Berechnung der Wandverluste und der thermischen Belastung der Bauteile von Dieselmotoren”. *MTZ 31/12*, pp. 491–499, 1970.
- [5] Lapuerta M., Armas O. y Bermudez V. “Sensitivity of Diesel engine thermodynamic cycle calculation to measurement errors and estimated parameters”. *Applied thermal engineering*, Vol. 20, pp. 843–861, 2000.
- [6] Tinaut F.V. *Contribución al estudio del proceso de combustión en motores de encendido por compresión de inyección directa*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1986.
- [7] Macian V. *Contribución al estudio de la influencia del movimiento del fluido sobre la dispersión cíclica y su caracterización*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1984.
- [8] Oliver E. *Estudio de sistemas de adquisición y tratamiento de datos en motores de combustión interna alternativos*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1991.
- [9] Armas O. *Diagnóstico experimental del proceso de combustión en motores Diesel de inyección directa*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 1998.

Capítulo 2

Diagnóstico de la combustión a partir de la presión

Índice

| | |
|---|-----------|
| 2.1. Introducción | 12 |
| 2.2. Parámetros del motor-instalación | 18 |
| 2.2.1. Relación de compresión | 18 |
| 2.2.2. Deformaciones mecánicas | 20 |
| 2.2.3. Desfase presión-volumen | 20 |
| 2.2.4. Transmisión de calor | 25 |
| 2.2.5. Coeficiente de torbellino medio | 29 |
| 2.3. Señales instantáneas | 33 |
| 2.3.1. Presión instantánea | 34 |
| 2.3.2. Tasa de inyección | 46 |
| 2.4. Variables medias | 49 |
| 2.4.1. Variables de control | 49 |
| 2.4.2. Variables de medida | 53 |
| 2.5. Modelo termodinámico de diagnóstico | 54 |
| 2.5.1. Cálculo del volumen instantáneo | 58 |
| 2.5.2. Cálculo de la transmisión de calor | 60 |
| 2.5.3. Balance másico y propiedades termodinámicas . . . | 64 |
| 2.5.4. Balance energético | 66 |
| Bibliografía | 72 |

2.1. Introducción

En los últimos años, el motor Diesel de inyección directa ha experimentado una importante evolución, favorecida por el avance en el conocimiento de los mecanismos básicos que gobiernan los procesos de renovación de la carga y la inyección-combustión. A ello ha contribuido la mejora de los métodos de estudio, que, atendiendo a la clasificación hecha por Lapuerta [1], se pueden clasificar en tres tipos:

- Técnicas experimentales, que incluyen ensayos en motores reales o en modelos físicos simplificados.
- Técnicas teóricas basadas en el empleo de modelos de cálculo, con diferente grado de complejidad.
- Técnicas de diagnóstico basadas en la medida e “interpretación” de alguna señal experimental.

Estas técnicas no se contemplan como vías alternativas sino complementarias, y han permitido abordar el estudio y comprensión de los fenómenos termofluidodinámicos implicados desde diferentes puntos de vista. Así, la elaboración de modelos teóricos permite interpretar los resultados experimentales e identificar las variables claves para orientar los experimentos. Los modelos de diagnóstico, por su parte, han permitido la sinergia entre las técnicas experimentales y teóricas.

Son diversas las **técnicas experimentales** destinadas al estudio de los MCIA. Por un lado, el empleo de *modelos físicos simplificados* para reproducir determinados fenómenos asociados al proceso de renovación de la carga o inyección-combustión, presenta una serie de ventajas entre las que destacan que permiten un control preciso de los parámetros de ensayo, permiten separar fenómenos físicos que en el motor real son simultáneos, proporcionan datos útiles para los modelos teóricos y facilitan el empleo de técnicas de diagnóstico difícilmente aplicables en el motor real.

Entre las técnicas basadas en el empleo de *modelos físicos simplificados* para el estudio de la renovación de la carga, se puede destacar la medida en el banco de flujo estacionario mediante medidas clásicas de parámetros globales o con anemometría Láser-Doppler (LDA) [2], que permiten obtener los coeficientes de descarga de las válvulas y caracterizar la formación de torbellino de una culata. Otros *modelos físicos simplificados* empleados para el estudio de