



TEMAS AVANZADOS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

F. Payri/J.M^a. Desantes

DETECCIÓN Y COMPENSACIÓN DE IRREGULARIDADES DE INYECCIÓN A TRAVÉS DE LA MEDIDA DEL RÉGIMEN INSTANTÁNEO DEL TURBOGRUPO



CARLOS GUARDIOLA

EDITORIAL REVERTÉ

TEMAS AVANZADOS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

F. Payri/J.Mª. Desantes

DETECCIÓN Y COMPENSACIÓN DE IRREGULARIDADES DE INYECCIÓN A TRAVÉS DE LA MEDIDA DEL RÉGIMEN INSTANTÁNEO DEL TURBOGRUPO

CARLOS GUARDIOLA

Dr. Ingeniero Industrial

Profesor Titular de Escuela Universitaria
del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos



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

Detección y compensación de irregularidades de inyección a través de la medida del régimen instantáneo del turbogrupo

Copyright © C. Guardiola

Edición en papel:

© Editorial Reverté. S.A., 2005

ISBN: 978-84-291-4705-6

Edición en e-book:

© Editorial Reverté. S.A., 2020

ISBN: 978-84-291-9089-2

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15, Local B

08029 Barcelona

Tel: (34) 93 419 33 36

e-mail: 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, queda rigurosamente prohibida, salvo excepción prevista en la ley. Asimismo queda prohibida la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamo públicos, la comunicación pública y la transformación de cualquier parte de esta publicación (incluido el diseño de la cubierta) sin la previa autorización de los titulares de la propiedad intelectual y de la Editorial. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (CEDRO) vela por el respeto a los citados derechos.

Prefacio

Tengo el placer de presentar este trabajo, realizado en el seno del grupo CMT-Motores Térmicos, y encuadrado en una productiva línea de investigación sobre el control y diagnóstico de motores Diesel turboalimentados. En concreto se ha abordado la posibilidad de emplear la medida del régimen instantáneo del turbogrupo de los motores diesel turboalimentados para obtener información que permita el diagnóstico y corrección de irregularidades de inyección.

El autor realiza un profundo estudio de las técnicas existentes para la detección de estos fallos, resaltando las principales ventajas e inconvenientes de las mismas. Este estudio permite contextualizar la opción que se presenta, que evita los principales inconvenientes de las técnicas convencionales. La combinación del análisis teórico del acoplamiento entre el motor y el turbogrupo, la información obtenida de ensayos experimentales y la simulación matemática, permite vertebrar un trabajo original y completo. Finalmente se realiza un estudio sobre la corrección en tiempo real de fallos de inyección, apuntando a interesantes posibilidades para el futuro de los motores Diesel.

Es de resaltar tanto la concisión de los resultados teóricos, apoyados en desarrollos matemáticos rigurosos, como el desarrollo de técnicas y equipos experimentales particulares. En este último aspecto hay que citar el desarrollo de un sistema para la medida de la variación cíclica del régimen de turbogrupo y la aplicación de técnicas de tratamiento digital de señales.

Finalmente quisiera dedicar unas líneas para presentar al autor: Carlos Guardiola es Profesor Titular de Escuela Universitaria y miembro del instituto CMT-Motores Térmicos. Autor de diversas publicaciones de carácter científico, ha centrado su investigación en la sobrealimentación y en el diagnóstico y control de motores de combustión interna alternativos. Ambas facetas de su actividad investigadoras se han conjugado perfectamente en el libro que nos ocupa que, estoy seguro, es sólo el principio de una brillante carrera científica.

José Manuel Luján Martínez
Profesor Titular de Universidad
CMT-Motores Térmicos
Universidad Politécnica de Valencia

Índice General

1	El control en motores de automoción	1
1.1	Introducción	1
1.2	Sistemas actuales de control	3
1.2.1	Principales bucles de control en MCIA	4
1.2.2	Aplicaciones existentes de la medida del régimen del turbogrupo	8
1.3	Sobre este libro	8
1.3.1	Objetivos	8
1.3.2	Metodología	9
	Bibliografía	13
2	Técnicas actuales de detección de irregularidades de inyección	15
2.1	Introducción	15
2.2	Definición del problema	16
2.2.1	Fallos de inyección-combustión en MEP	17
2.2.2	Fallos de inyección-combustión en MEC	18
2.2.3	Potencial de corrección de fallos	19
2.3	Normativa y tendencias futuras	20
2.4	Métodos actuales para la detección de fallos	23
2.4.1	Métodos basados en la variación instantánea del régimen del motor	23

2.4.1.1	Clasificación de los métodos de detección . . .	24
2.4.1.2	Principales aportaciones	29
2.4.1.3	Ventajas	35
2.4.1.4	Inconvenientes	36
2.4.2	Métodos alternativos	38
2.4.2.1	Medida de presión en cámara y otros métodos intrusivos	38
2.4.2.2	Ruido de combustión	40
2.4.2.3	Medida de vibraciones	41
2.4.2.4	Medida de concentración de oxígeno en el colector de escape	41
2.4.2.5	Medida del par instantáneo	42
2.4.2.6	Medida de la presión de escape	42
2.4.2.7	Medida de la temperatura de escape	43
2.5	Conclusiones	43
	Bibliografía	44
3	Medida del régimen del turbogruppo	53
3.1	Introducción	53
3.2	Problemática asociada	56
3.3	Métodos de medida del régimen del turbogruppo	58
3.3.1	Vibraciones	58
3.3.2	Métodos ópticos	60
3.3.3	Corrientes de Foucault	61
3.3.3.1	Principio de funcionamiento	61
3.3.3.2	Equipos específicos para la medida del régimen del turbogruppo	63
3.3.3.3	Adaptación de equipos para la medida de vibraciones	65
3.3.3.4	Problemas asociados a la dispersión de fabricación de los álabes	67

3.4	Determinación del régimen instantáneo del turbogruppo	70
3.4.1	Consideraciones generales	70
3.4.1.1	A partir de una señal analógica	70
3.4.1.2	A partir de una señal digital	71
3.4.2	Muestreo en tiempo frente a muestreo en ángulo	73
3.4.2.1	Medida de $d\theta_t/dt$ frente a medida de $d\theta_t/d\theta$	74
	Bibliografía	74
4	Técnicas experimentales y de simulación	77
4.1	Introducción	77
4.2	Instalaciones experimentales	78
4.2.1	Motores y salas de ensayo. Descripción general.	78
4.2.2	Adquisición de señales	80
4.2.3	Métodos de medida de n_t empleados	81
4.2.4	Equipo DELCOM	83
4.2.4.1	Simulación de fallos de inyección	84
4.2.4.2	Medición de regularidad de giro y n_t	86
4.2.5	Modos posibles de operación	87
4.3	Modelo de acción de ondas	89
4.3.1	Introducción	89
4.3.2	WAM	91
4.3.2.1	Método de Lax-Wendroff	92
4.3.2.2	Modelo de turbocompresor	93
4.3.2.3	Modelo de turbina	95
4.3.3	Adaptación del modelo para el estudio de la variación de n_t	96
4.3.4	Ajuste para un motor determinado	97
4.3.5	Comprobación de la validez del WAM	98
	Bibliografía	101

5	Variaciones instantáneas de n_t	105
5.1	Introducción	105
5.2	Ecuaciones características del turbogruppo	106
5.2.1	Turbocompresor	106
5.2.1.1	Condiciones de bombeo	109
5.2.2	Turbina	111
5.2.2.1	Relación $\dot{m}_t$ - P_3	112
5.2.2.2	Rendimiento de la turbina η_t	114
5.2.3	Acoplamiento motor-turbogruppo	114
5.2.3.1	Motor estabilizado	115
5.2.3.2	Respuesta en transitorios	117
5.2.4	Variación instantánea de n_t	120
5.2.4.1	Variación de instantánea n_t en condiciones de bombeo	124
5.3	Observación de la presión de escape a partir de la medida de n_t	126
5.3.1	Desarrollo de un observador de $\tilde{P}_3$	126
5.3.1.1	Ajuste del modelo	127
5.3.1.2	Aplicación a diferentes puntos de funcionamiento	128
5.3.2	Aplicación al <i>motor B</i>	128
5.3.2.1	Plan experimental	128
5.3.2.2	Resultados y discusión	129
5.4	Conclusiones	135
5.A	Anexo: influencia de la pulsación de $\dot{W}_c$ sobre n_t	136
	Bibliografía	138
6	Corrección de la inyección a partir de $n_t(t)$	141
6.1	Introducción	141
6.2	Estudio en frecuencia del régimen del turbogruppo	142
6.2.1	Carácter pulsante del régimen del turbogruppo	142

6.2.2	Descomposición en componentes armónicas	143
6.3	Espectro del régimen del turbogruppo	147
6.3.1	Espectro de n_t en ausencia de fallos de inyección	147
6.3.1.1	Variación del grado de carga	149
6.3.1.2	Variación del régimen de giro del motor	150
6.3.1.3	Efectos de la turbina de geometría variable . .	152
6.3.1.4	Efectos de la recirculación de gases de escape y del <i>waste gate</i>	154
6.3.1.5	Efectos de los parámetros geométricos sobre el espectro de n_t	157
6.3.2	Espectro del régimen del turbogruppo en presencia de fallos de inyección-combustión	161
6.3.2.1	Efecto de fallos en un único cilindro	161
6.3.2.2	Superposición de fallos	167
6.4	Desarrollo de un controlador para la corrección de la inyección	167
6.4.1	Hipótesis de partida	168
6.4.2	Construcción de una transformación lineal	171
6.4.2.1	Forma canónica de la transformación lineal . .	171
6.4.2.2	Ajuste de la transformación lineal	175
6.4.2.3	Inversión de la transformación lineal	176
6.4.3	Adaptación a diferentes regímenes de giro y grados de carga	178
6.4.4	Algoritmo de corrección	179
6.4.4.1	Características del controlador	183
6.4.4.2	Sensibilidad ante errores de fase	186
6.4.4.3	Sensibilidad ante errores de magnitud	188
6.4.4.4	Sensibilidad ante errores en $\vec{e}_0$	189
6.4.5	Resultados	189
6.5	Colaboración entre diversos algoritmos de regularidad de inyec- ción	190

6.6	Conclusiones	192
6.A	Anexo: parámetros suficientes para identificar irregularidades .	193
6.B	Anexo: cálculo iterativo de la DFT	196
6.C	Anexo: propiedades y demostraciones	199
6.C.1	Principales propiedades de Z y Z_p	199
6.C.2	Principales propiedades de R y Φ	202
6.C.3	Autovalores de la matriz A	203
6.C.4	Forma general del controlador	204
	Bibliografía	205
7	Resultados experimentales	207
7.1	Introducción	207
7.2	Condiciones de los ensayos y plan experimental	208
7.3	Caracterización del sistema	210
7.4	Diagnóstico de la inyección a partir de n_t	213
7.4.1	Estudio de fallos de diversa magnitud	213
7.4.2	Estudio ante la variación del grado de carga	215
7.4.3	Estudio ante la variación de la posición de la TGV	217
7.4.4	Variación del punto de funcionamiento en el mapa motor	220
7.4.5	Ajuste de la transformación lineal y detección de fallos múltiples	223
7.5	Comparación con técnicas alternativas	228
7.5.1	A partir del régimen de giro del motor	229
7.5.2	A partir de P_3	232
7.5.3	A partir de T_3	232
7.5.4	Resumen	235
7.6	Corrección de la inyección con n_t	238
7.6.1	Controlador implementado	238
7.6.2	Resultados en bucle cerrado	240

7.6.2.1	Sintonizado del controlador	240
7.6.2.2	Resultados en el punto de diseño	242
7.6.2.3	Resultados al variar la posición de la TGV . . .	242
7.6.2.4	Resultados en diferentes puntos del mapa motor	247
7.6.2.5	Respuesta ante transitorios de régimen y carga	249
7.7	Conclusiones	250
7.A	Anexo: enfoque unificado a través de la DFT	250
	Bibliografía	251
8	Conclusiones y trabajos futuros	253
8.1	Principales aportaciones y conclusiones	253
8.1.1	Técnicas experimentales	253
8.1.2	Variación instantánea de n_t y relación P_3 - n_t	254
8.1.3	Efecto de las irregularidades de la inyección sobre n_t . .	254
8.1.4	Controlador multivariable basado en la DFT	254
8.1.5	Comparación de diversas técnicas de detección de fallos de inyección	255
8.2	Trabajos futuros	255
8.2.1	De carácter científico	256
8.2.2	De carácter tecnológico	257
	Índice Bibliográfico	259

Tabla de símbolos

a	Velocidad del sonido
c	Velocidad del gas
	Parámetro de la acción integral del controlador
	Factor de corrección del modelo de $\tilde{P}_3$
c_p	Calor específico a presión constante
f	Frecuencia
f_c	Frecuencia del ciclo termodinámico
f_e	Frecuencia de excitación
f_r	Frecuencia relativa f/f_c
f_s	Frecuencia de muestreo
n	Régimen de giro del motor
n_t	Régimen de giro del turbogruppo
$\dot{m}$	Gasto másico
$\vec{m}_f$	Vector de combustible inyectado
r^2	coeficiente cuadrático de correlación
s	Carrera
r_k	Ganancia del armónico k
t	Tiempo
t_s	Periodo de muestreo
z	Número de cilindros
A	Matriz del sistema en bucle cerrado
A_{iny}	Área inyector
A_{ef}	Área efectiva de la TGV
C	Matriz del controlador
E	Matriz identidad
F	Dosado
G	Sensibilidad
I	Momento de inercia
	Distribución impulso unitario
K	Matriz del modelo $\vec{\varepsilon}-\Delta\vec{m}_f$
$\tilde{K}$	Matriz del observador $\Delta\vec{m}_f-\vec{\varepsilon}$ (6.21)

M_1, M_2	Matrices de transformación (6.21)
M	Par
N	Número de muestras de una señal discreta
P	Presión
R	Constante de los gases
	Matriz de ganancia (6.16)
T	Temperatura
$\dot{W}$	Potencia
Z	Matriz geométrica (6.16)
Z_p	Matriz geométrica transformada (6.22)
α	Grado de carga
$\vec{\beta}$	Vector de acciones de control
γ	Razón de calores específicos c_p/c_v
$\delta \vec{m}_{f_0}$	Error del controlador en bucle cerrado
δn_t	Resolución en la medida de n_t
δr_k	Error en la parametrización de r_k
δR	Error en la parametrización de R
$\delta \vec{\varepsilon}_0$	Error en la parametrización de $\vec{\varepsilon}_0$
$\delta \phi_k$	Error en la parametrización de ϕ_k
$\delta \Phi$	Error en la parametrización de Φ
$\vec{\varepsilon}'$	Vector espectro
$\vec{\varepsilon}_0$	Vector espectro en ausencia de fallos
η	Rendimiento
θ	Ángulo del cigüeñal
θ_t	Ángulo del turbogruppo
λ	Exceso de aire
ξ	Error
ρ	Densidad
σ	Espectro de una matriz
	Desviación típica
τ_e	Periodo de excitación
ϕ_k	Fase del armónico k
Λ_i	i -ésimo pulso energético
Ξ	Función de corrección para el observador de $\tilde{P}_3$
Π	Relación de presiones
Φ	Matriz de giro (6.16)

Subíndices

0	Condiciones ambiente
1	condiciones a la entrada del compresor
1'	condiciones intermedias del compresor
2	Condiciones a la salida del compresor
2'	Condiciones a la salida del <i>intercooler</i>
3	Condiciones a la entrada de la turbina

$3'$	Condiciones intermedias de la turbina
4	Condiciones a la salida de la turbina
a	Aire
c	Compresor
e	Valor efectivo del motor
egr	Gas de escape recirculado
f	Combustible
m	Pérdidas mecánicas
s	Isentrópico
t	Turbina

Símbolos y operadores matemáticos

Δ	Variación
Im	Parte imaginaria
Re	Parte real
$\cos$	Coseno
$\sin$	Seno
$\sec$	Secante
$\csc$	Cosecante
$\tan$	Tangente
$*$	Conjugado
	Corregido
T	Transpuesta
$\cdot$	Derivada temporal
$-$	Valor medio
$\sim$	Valor pulsante
$\wedge$	Relativo al controlador
d	Diferencial
e	Número e
j	Variable compleja $\sqrt{-1}$
$\mathbb{R}$	Conjunto números reales

Siglas

CR	Sistema de inyección <i>common rail</i>
DELCOM	Demostrador de control electrónico de motores
DFT	Transformada discreta de Fourier
DMMT	Departamento de Máquinas y Motores Térmicos
ECU	Unidad de control electrónico
EGR	Recirculación de gases de escape
PWM	Modulación por ancho de impulso
MCIA	Motor de combustión interna alternativo
MEC	Motor de encendido por compresión
MEP	Motor de encendido provocado

OBD	<i>On board diagnostics</i>
TGV	Turbina de geometría variable
TURBO	Equipo de medida de n_t
WAM	Modelo de acción de ondas (<i>Wave action model</i>)
WG	Sistema <i>waste gate</i>

Capítulo 1

El control en motores de automoción

1.1 Introducción

El uso del control electrónico en los motores se ha extendido de forma considerable en los últimos años. Hoy en día, la práctica totalidad de los sistemas que podemos encontrar en motores de automoción se hallan gestionados en mayor o menor medida a través de sistemas de control electrónico. Las ventajas que permiten los sistemas de gestión electrónicos son numerosas:

- Aumento de las prestaciones y eficiencia del motor: los procesos de inyección y encendido gestionados electrónicamente han permitido la optimización local de parámetros íntimamente relacionados con las prestaciones y la eficiencia de los motores (como la riqueza y el punto de encendido en motores de encendido provocado, y la presión y avance de inyección en motores de encendido por compresión). Aunque resulta exagerado achacar toda esta mejora a la contribución de la electrónica, sí que es cierto que los más modernos sistemas de inyección resultarían inimaginables sin la componente electrónica.
- Control avanzado del sistema motor: los controladores electrónicos en bucle cerrado han mejorado de forma importante la gestión de los diferentes elementos presentes en los motores de última generación (como pueden ser la recirculación de gases de escape y la sobrealimentación

por turbina de geometría variable). Estos controladores, de prestaciones y versatilidad muy superiores a los clásicos sistemas neumáticos o centrífugos, han permitido la integración de sistemas de complejidad creciente.

- Disminución de las emisiones contaminantes: Actualmente, la legislación medioambiental es uno de los mayores focos de impulso para la investigación y mejora de los motores. La aplicación de las tecnologías actuales de control de emisiones precisa del control electrónico. La implantación del control de riqueza con sonda λ , el control del porcentaje de EGR y la regeneración del filtro de partículas, son ejemplos concretos que nos muestran la importancia del control electrónico para el control de emisiones.
- Mayor interacción entre el motor y otros sistemas del vehículo: la interconexión de los diferentes subsistemas que conforman el vehículo (el motor, la interfaz del conductor, la gestión del habitáculo, los sistemas de tracción y de frenado, etc.) permiten una gestión globalizada atendiendo a los efectos cruzados entre cada uno de ellos. En la actualidad se han desarrollado redes de comunicación específicas para automoción con el fin de reducir el cableado y aumentar la seguridad y robustez de las comunicaciones.

Consecuentemente, el número de sensores se ha visto incrementado, así como la capacidad de los microcontroladores y la complejidad de los algoritmos de control. Siendo un aspecto tan crítico sobre prestaciones, eficiencia y emisiones contaminantes, se hace necesaria la existencia de **algoritmos de diagnóstico** capaces de detectar la existencia de fallos tanto en el propio motor como en la sensorización o la lógica de control. Esta necesidad de diagnóstico, además del beneficio que supone para el funcionamiento global del sistema, ha sido sancionada a través de la normativa vigente [1, 2]. La relación entre control y diagnóstico es realmente estrecha, pudiendo emplearse la información obtenida a través del diagnóstico en la base de una acción de control posterior encaminada a resolver las deficiencias existentes, o a garantizar la seguridad del sistema.

Un tema crítico que afecta tanto a las prestaciones como a las emisiones es asegurar la cantidad de combustible inyectado en cada cilindro, así como la correcta realización del proceso de combustión. La dispersión de fabricación entre los diferentes cilindros e inyectores conlleva un funcionamiento fuera de

diseño y tiene, como consecuencia final, el aumento de emisiones e incluso la aparición de fallos de encendido (especialmente en los motores de encendido provocado). También el efecto de la deriva de los inyectores, causado entre otros motivos por el ensuciamiento de los inyectores, agrava este fenómeno. Tal circunstancia es crítica en el caso de los motores Diesel de inyección directa, donde los diámetros efectivos de los inyectores son mínimos.

Desde el principio de la década de los 90, se han sucedido los intentos por detectar tales deficiencias, la mayor parte de ellos utilizando la medida de la regularidad de giro del motor. Aunque los resultados obtenidos son satisfactorios en muchos casos, aún existen problemas para la detección de fallos en el proceso de inyección-combustión en condiciones de alto régimen de giro o baja carga. En el presente estudio se plantea una alternativa a los sistemas convencionales de detección, basada en la medida de la variación instantánea del régimen de giro del turbogrupo.

De hecho, esta monografía trata de abordar desde un punto de vista general la interacción entre el turbogrupo y el motor. Más concretamente se estudia la posibilidad de emplear la información del régimen de giro del turbogrupo para la ejecución de algoritmos de diagnóstico y control. Siendo una máquina íntimamente ligada al motor, es de esperar que las variaciones instantáneas en sus variables de funcionamiento se vean afectadas por las circunstancias operativas del motor. Tal circunstancia se puede aprovechar para mejorar los algoritmos existentes relativos a la gestión del aire y de la *inyección*.

Aunque en el planteamiento del trabajo es general, en sus aspectos más concretos se centrará en el estudio de motores Diesel sobrealimentados de inyección directa.

1.2 Sistemas actuales de control

En esta sección se contextualizará el trabajo según diferentes puntos de vista. En el apartado 1.2.1 se hace un recorrido general de los diferentes bucles de control existentes en un motor de última generación, así como las últimas aportaciones que, aunque aún no están implementadas en motores comerciales, sí han sido presentadas en los foros de comunicación científica. Por su extensión, se ha creído conveniente dedicar un capítulo completo a la descripción de los diferentes métodos para la detección y corrección de los fallos en el sistema de inyección-combustión basados en la medida de la variación

del régimen del cigüeñal. En el apartado 1.2.2 se hablará de las aportaciones que han utilizado específicamente la medida del régimen del turbogrupo como variable de control o diagnóstico.

1.2.1 Principales bucles de control en MCIA

La multiplicación de sensores ha permitido un aumento de los bucles de control en los motores de combustión interna alternativos. Tales bucles rara vez son independientes y se hallan interrelacionados a través de una estructura de más alto nivel programada en la *Unidad de Control Electrónico* (ECU), que gestiona los conflictos e interacciones cruzadas que pudiesen existir entre los diferentes controladores. También se programan las estructuras de decisión que gestionan las actuaciones en caso de error en el sistema o de detección de un fallo.

Obviando este gran entramado general, es posible llegar a relacionar los diferentes pares de variables medidas y controladas por cada uno de los bucles. En la figura 1.1 se puede observar un esquema general del control de un motor Diesel de inyección directa *common rail* (CR). Las flechas negras indican la relación causa-efecto de los diferentes elementos presentes en un motor de estas características. Se han marcado con flechas de color gris los diferentes bucles de control existentes. Las flechas en trazo continuo indican soluciones que en la actualidad se están explotando comercialmente (nótese que se han obviado sistemas como el filtro de partículas). El trazo discontinuo se ha reservado para aquellas alternativas que han sido presentadas en foros científicos y que se encuentran en diverso estado de desarrollo. Finalmente en doble trazo se ha marcado la posibilidad que presenta la monografía que nos ocupa.

Primeramente se procederá a una descripción somera de los bucles más representativos aplicados actualmente en los motores Diesel CR [3, 4]:

Gestión del aire. En este epígrafe nos referiremos a todo lo relacionado con la circulación de aire a través del motor. Generalmente el control del aire permitirá satisfacer las demandas en términos de gasto másico de aire y porcentaje de EGR. Dado el problema asociado a la medida del porcentaje de EGR, generalmente se fija éste de forma indirecta a partir del gasto de aire. El bucle de control básico asume que satisfaciendo los requerimientos en el par gasto de aire-presión de sobrealimentación ($\dot{m}_a, P_2$) se puede cumplir las especificaciones impuestas en gasto de aire y EGR ($\dot{m}_a, \dot{m}_{egr}$). Para conseguir

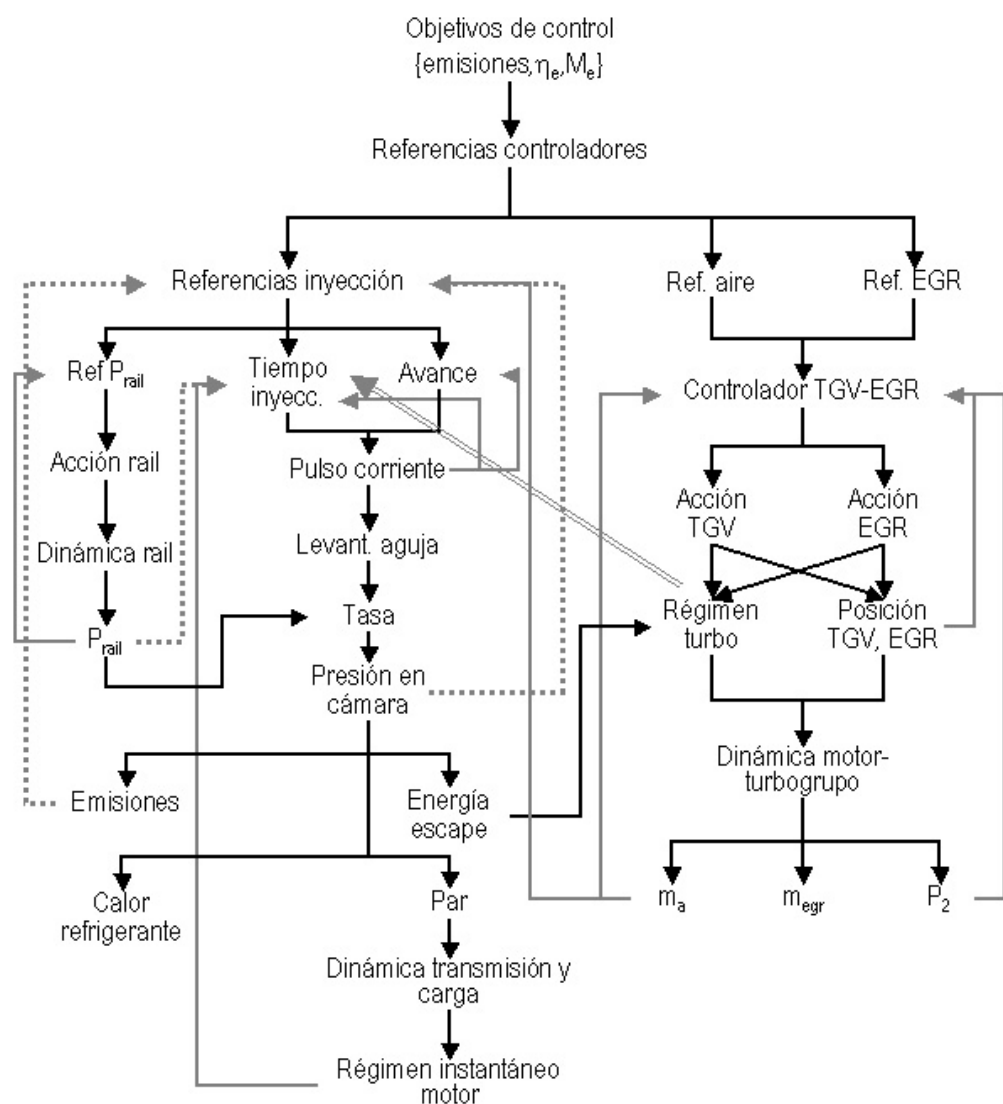


Figura 1.1. Principales bucles de control en un motor Diesel CR. —: relaciones físicas. —: bucles de control convencionales. - - -: bucles de control en desarrollo. ==: bucle de control estudiado en el presente trabajo.

tal objetivo, se suele actuar sobre la válvula de EGR¹ y el sistema de sobrealimentación empleado (comúnmente turbina de geometría variable o *waste gate*). El emparejamiento clásico de las variables realiza el control de $\dot{m}_a$ con la válvula de EGR y de P_2 con el sistema de sobrealimentación. Dado el importante acoplamiento entre ambos bucles, es un tema de investigación actual la ejecución de controladores multivariables que permitan el control conjunto de ambas variables [5–8].

También, con el fin de evitar los grandes fenómenos de histéresis propios de las válvulas electro-neumáticas, se han extendido los bucles de control en posición, que actúan en forma de controladores en cascada utilizando para ello la medida de captadores de posición.

Control de la inyección. La gestión de la inyección en un motor CR se efectúa mediante el uso, en la mayor parte de los casos, de un controlador que asegura el valor de la presión en el rail (actuando para ello sobre la válvula de descarga), así como un controlador que asegura que el tiempo de inyección corresponde con el de referencia. Nótese que no existe ningún tipo de retroalimentación sobre la cantidad de combustible inyectado. Al tratarse de un sistema hidromecánico complejo, disfunciones en el levantamiento de la aguja o una permeabilidad del inyector diferente de la de diseño, suponen variaciones en la cantidad de combustible efectiva.

Detección de fallos de combustión. La medida de la regularidad del régimen de giro del motor durante un ciclo termodinámico permite obtener un diagnóstico sobre la existencia de problemas de encendido. Este punto es específicamente abordado por la normativa existente concerniente a diagnóstico. Además, un análisis más fino permite detectar posibles variaciones de un inyector frente al resto, que afectan de forma significativa a la regularidad del régimen de giro, de manera que pueden corregirse. Ambos aspectos han sido abordados por numerosos autores, y en el Capítulo 2 se presenta una revisión exhaustiva sobre el tema.

Limitador de humos. Para evitar las emisiones excesivas de partículas durante la puesta en carga del motor, existe un control que limita la cantidad

¹En algunos casos los motores están dotados de válvulas que permiten estrangular la admisión con el fin de aumentar el porcentaje de gas recirculado.

de combustible inyectada a partir de la determinación del aire admitido. Para no sobrepasar la riqueza límite, se emplea la medida del gasto másico admitido o de la presión de sobrealimentación.

En vías de desarrollo se encuentran algoritmos de control que permitirán mejoras muy notables en un futuro próximo. Entre ellos pueden destacarse:

Empleo de sondas de contaminantes en el colector de escape. La medida directa de las emisiones contaminantes permitirá realizar un control más preciso y con mayor tolerancia a errores. Nótese que en el resto de estrategias de control presentadas, la referencia no tiene relación directa con los objetivos finales (potencia, consumo y emisiones). En el caso de medir las emisiones, la retroalimentación sería completa. Desafortunadamente, en la actualidad los sensores carecen de las características de robustez y bajo coste exigidos para su implantación comercial. Además, la respuesta de las sondas de contaminantes existentes suele ser de dinámica excesivamente lenta para su utilización como herramienta de control, limitándose su aplicación únicamente a tareas de diagnóstico. También es un problema por dilucidar cómo optimizar los parámetros de funcionamiento del motor en función de la diferencia entre los objetivos en términos de prestaciones y emisiones y lo obtenido realmente (hay que recordar que la calibración es un aspecto delicado y que aún no está completamente resuelto [9, 10]). Un caso particular por su incidencia es el uso de sensores de concentración de oxígeno, mejor conocidos como sonda λ . En el caso de motores de encendido provocado, que trabajan con dosado estequiométrico, se trata de un sensor de casi obligado uso para el correcto funcionamiento de los sistemas catalizadores de tres vías. Algunos autores han estudiado la posibilidad de diagnosticar la combustión a partir de este tipo de sondas [11, 12]. En el campo de aplicación Diesel diversos investigadores han trabajado con sondas λ lineales para mejorar el control del EGR [13].

Utilización de la variación instantánea de las variables dentro del ciclo termodinámico. El tratamiento con alta frecuencia de adquisición de las señales provenientes de sensores convencionales o no convencionales se perfila como una clave para la mejora del control del motor. En la actualidad tal tratamiento sólo se da al régimen de giro del motor; más allá de los meros problemas de tiempo de computación, la medida y tratamiento de diversas señales, como pueden ser las presiones en los colectores o las vibraciones del bloque motor, pudiendo particularizar los eventos a lo largo del ciclo

termodinámico pueden permitir un diagnóstico muy sensible a pequeños defectos de funcionamiento. Mención especial merece la medida de la **presión en cámara** [14], aspecto que será analizado con detenimiento en el apartado 2.4.2.1.

1.2.2 Aplicaciones existentes de la medida del régimen del turbogrupo

Existen pocas referencias bibliográficas del empleo del régimen del turbogrupo para el control o diagnóstico de motores. Aunque el régimen de giro es un parámetro crítico en el funcionamiento del turbogrupo y por tanto de la sobrealimentación, generalmente las tareas de control se confían a la medida de la presión y del gasto de aire. Por contra, esta variable sí que es medida de forma generalizada en la mayoría de instalaciones de investigación y desarrollo.

El estudio del régimen de giro del turbogrupo en aplicaciones de sobrealimentación se ha reducido históricamente al análisis de su valor medio, no existiendo referencias sobre la variación del régimen del turbogrupo asociada con las pulsaciones de escape. Por otra parte algunos investigadores han empleado el régimen del turbogrupo para la medida indirecta de la potencia instantánea al ensayar turbinas en bancos específicos [15].

1.3 Sobre este libro

A continuación se presentan los objetivos perseguidos en este trabajo, así como la metodología que se ha llevado a cabo para permitir su realización.

1.3.1 Objetivos

Los principales objetivos del trabajo que se aborda son:

- Puesta a punto de herramientas para la medida y tratamiento del régimen instantáneo del turbogrupo. La variación instantánea del régimen del turbogrupo es una variable de difícil medida sujeta a grandes ruidos que enmascaran la señal. Por lo tanto, un especial esfuerzo será dedicado al desarrollo de herramientas matemáticas para el filtrado de la señal. Paralelamente, la implementación de algoritmos de control en tiempo

real precisa de sistemas electrónicos capaces de realizar la adquisición, el tratamiento digital y la actuación en tiempos razonables.

- Relacionar la velocidad de giro del turbogruppo con las variables de funcionamiento del motor. El estudio del acoplamiento entre el motor y turbogruppo permitirá relacionar los parámetros de funcionamiento de ambos sistemas. En el trabajo que nos ocupa, dicho análisis se centrará en la variación instantánea del régimen del turbogruppo a lo largo de un ciclo del motor.
- Utilizar la variación del régimen del turbogruppo como herramienta de diagnóstico del proceso de inyección-combustión. Una vez establecida la relación entre las variables de funcionamiento del motor y el régimen instantáneo del turbogruppo, parece posible emplear éste para diagnosticar el primero. Más particularmente, la disminución en el combustible inyectado supondrá una merma en la energía disponible en la turbina, que deberá reflejarse en una bajada puntual en el régimen del turbogruppo.
- Diseño de un controlador en bucle cerrado que permita la corrección automática en tiempo real de los fallos de inyección y deriva de los inyectores.

1.3.2 Metodología

Un correcto planteamiento metodológico es condición indispensable para la consecución de los objetivos anteriormente presentados. En la figura 1.2 se esquematizan los pasos y tareas concretas a realizar dentro del marco del presente trabajo. A continuación se hace una descripción somera de los mismos y se relacionan con la estructura del presente documento. Nótese que aunque el proceso es lineal en su concepción, no lo es en absoluto en su ejecución, y serán requeridas diversas iteraciones hasta obtener los resultados deseados.

1. **Revisión bibliográfica.** Con el fin de contextualizar el trabajo de investigación dentro del estado actual de la ciencia, se hace imprescindible una revisión exhaustiva que comprenda los principales puntos relacionados con el mismo. Más concretamente:

- Soluciones actuales para la corrección de la regularidad de inyección entre cilindros, atendiendo tanto a las técnicas convencionales basa-

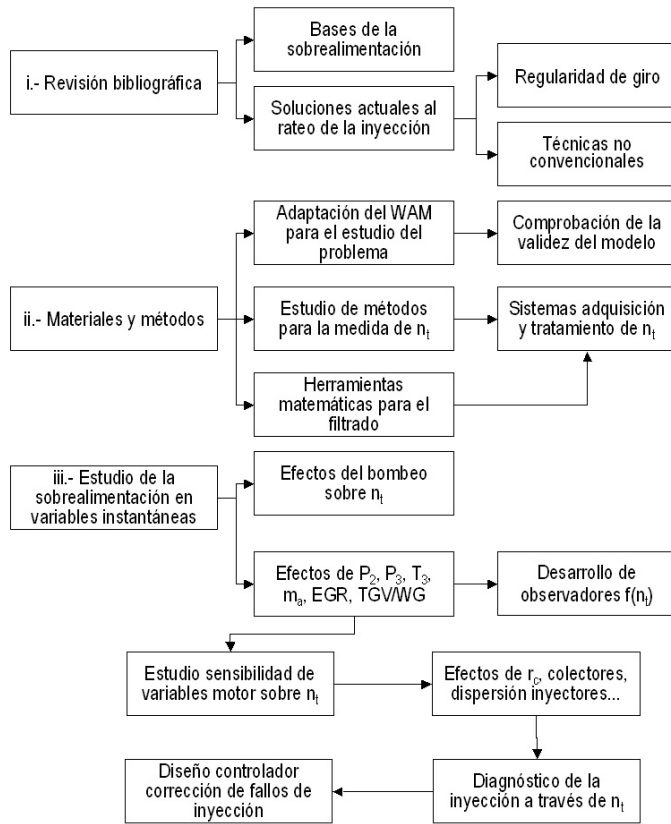


Figura 1.2. Planteamiento metodológico.

das en el estudio de la regularidad de giro del motor como a técnicas no convencionales. Estos aspectos se tratarán en el Capítulo 2.

- Estudio de las bases físicas que rigen la sobrealimentación. La expresión de estos principios por medio de ecuaciones matemáticas servirá de base para el estudio de la sobrealimentación en variables medias e instantáneas que se presenta en el Capítulo 5. Especial atención merecerán aspectos tan dispares como el bombeo del turbocompresor, el rendimiento de la turbina en flujo pulsante o la simulación del sistema motor mediante modelos de acción de ondas.

2. Materiales y métodos. Se hacen necesarias una serie de mejoras en las herramientas existentes en varios aspectos, como son:

- El uso de un modelo matemático para la simulación del acoplamiento motor-turbogrupo se perfila como una herramienta ideal para el desarrollo de sistemas de diagnóstico basados en fenómenos fluidodinámicos. Tal modelo permitirá una aproximación sencilla al problema así como la realización de estudios paramétricos y de sensibilidad de otra forma difíciles de realizar (relacionados, por ejemplo, con la dispersión entre diferentes cilindros en cuestiones como la relación de compresión, o a la influencia de la geometría de los colectores). El Departamento de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia cuenta con un modelo de acción de ondas (WAM) que ha sido empleado en múltiples trabajos de investigación previos. Sin embargo, se hace necesaria una validación previa que evalúe su adecuación al estudio de la sobrealimentación en variables instantáneas.
- La medida de la variación instantánea del régimen del turbogrupo, indispensable para la consecución de los objetivos planteados. El régimen del turbogrupo, aunque es habitualmente medido en entornos de investigación, no se muestrea a alta frecuencia. Tanto el ruido asociado a la medida propiamente dicha, como el efecto de la dispersión de fabricación de los álabes, influyen de forma no despreciable sobre dicha medida. Para minimizar el efecto de este ruido, se deben poner a punto herramientas de tratamiento y filtrado digital. Además, la necesidad de mantener la fase entre la medida del régimen del turbogrupo y el ángulo de giro del motor precisa desarrollar sistemas de sincronización entre ambas señales (en este caso el uso de un *trigger* externo no da resultados satisfactorios).

La descripción del principio de medida del régimen del turbogrupo y la exposición teórica de los principales problemas asociados se presentará en el Capítulo 3. Las instalaciones experimentales, así como los equipos específicos desarrollados en el marco del presente trabajo, se recogen en el Capítulo 4. También en ese capítulo se presentará brevemente el WAM y se justificará su validez para el estudio que se realiza más adelante.

3. Estudio de la sobrealimentación en variables instantáneas. En el Capítulo 5 se realiza una descripción de la sobrealimentación desde el

punto de vista teórico. El estudio comprende tanto el funcionamiento estable del compresor como la aparición de inestabilidades -o bombeo- del turbocompresor. Generalmente la sobrealimentación se ha analizado atendiendo únicamente a los valores medios de las diferentes variables. En esta monografía se va más allá en escala temporal y se presenta la variación instantánea de la velocidad de giro del turbogruppo como consecuencia de las pulsaciones en las diferentes variables del motor, tales como presión de escape, temperatura de escape, presión de sobrealimentación, régimen de giro del motor, etc. Tales relaciones podrán emplearse para la generación de *observadores*, o sensores *software*, que permitan predecir algunas variables de funcionamiento del motor a partir de la variación del régimen del turbogruppo. La posibilidad y aplicación de tales estructuras completan el Capítulo 5. Una vez demostrada la relación entre las variables de funcionamiento del motor y el comportamiento del turbogruppo, en el Capítulo 6 se estudia el efecto global sobre el régimen de giro del turbogruppo del acoplamiento motor-turbogruppo. El estudio mediante el WAM permite determinar el efecto de la relación de compresión de los diferentes cilindros, de la geometría de los colectores de admisión y de escape y, principalmente, de la cantidad de combustible inyectado en cada uno de los cilindros. El efecto de este último factor sobre el régimen instantáneo del turbogruppo se aprovechará para diagnosticar el proceso de inyección-combustión. Además, se comprueba el efecto de diferentes fallos simultáneos y se analiza la posibilidad de linealizar el problema. Más aún, una vez establecida la linealidad del sistema, la adecuación del principio de diagnóstico para generar un controlador multivariable en bucle cerrado se presenta como consecuencia directa. Nótese la **dualidad experimental-modelado** que se ha seguido en el proceso. Así como en el Capítulo 5 se parte de una base física teórica y se generan estructuras matemáticas que serán comprobadas experimentalmente, en el Capítulo 6 el análisis se hace a través del WAM, evaluando también en simulación la validez del controlador multivariable desarrollado. Evidentemente esta forma de actuar precisa de un paso intermedio del que ya se ha hablado anteriormente: la comprobación de validez del modelo. Finalmente, y para asegurar su aplicabilidad, los resultados obtenidos deberán comprobarse experimentalmente y a tal efecto se dedica el Capítulo 7.

Finalmente en el Capítulo 8 se realiza un compendio de las principales aportaciones y resultados de la presente monografía, así como se plantean los