



CUESTIONES Y PROBLEMAS RESUELTOS DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS



2ª EDICIÓN

**José Javier López Sánchez
Francisco Javier Salvador Rubio
Ricardo Novella Rosa
Antonio García Martínez**

**EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

José Javier López Sánchez
Francisco Javier Salvador Rubio
Ricardo Novella Rosa
Antonio García Martínez

Cuestiones y problemas resueltos de motores de combustión interna alternativos

2ª edición

**EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: LÓPEZ SÁNCHEZ, JOSÉ JAVIER, [et al]. (2013) *Cuestiones y problemas resueltos de motores de combustión interna alternativos*. Valencia: Universitat Politècnica

Primera edición, 2008
Segunda edición 2013

© José Javier López Sánchez
Francisco Javier Salvador Rubio
Ricardo Novella Rosa
Antonio García Martínez

© de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València

Distribución: pedidos@editorial.upv.es /
Telf. 963 877 012/ www.lalibreria.upv.es / Ref. 944

Imprime: Byprint percom, sl

ISBN: 978-84-9048-052-6
Impreso bajo demanda

Queda prohibida la reproducción, la distribución, la comercialización, la transformación y, en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de la totalidad o de cualquier parte de esta obra sin autorización expresa y por escrito de los autores.

Impreso en España

Prólogo

Me resulta muy grato poder presentar nuevamente este libro de cuestiones y problemas resueltos de **Motores de Combustión Interna Alternativos** (MCIA), el cual se ha ido gestando tras varios años de empeño y dedicación por parte de todo el equipo de profesores del *Departamento de Máquinas y Motores Térmicos* de la *Universitat Politècnica de València*.

Por un lado, conviene tener en cuenta que en los MCIA entran en juego muchas disciplinas diversas: la mecánica, la transferencia de calor, la termodinámica, la mecánica de fluidos, la metalurgia, la química, etc. El conocimiento profundo de los procesos que ocurren dentro de ellos, que es esencial para comprender a fondo su comportamiento, es difícil de conseguir, puesto que requiere un amplio abanico de conocimientos y, lo que quizás es más difícil, su interconexión. El presente libro ofrece al lector la posibilidad de reflexionar sobre aspectos muy diversos de los MCIA, tratando de conectar los puntos de vista de las distintas disciplinas para entender lo que ahí ocurre.

Por otro lado, el mundo de los MCIA siempre ha sido un mundo que ha apasionado (y apasiona) a muchas personas. Esta obra ofrece una serie de recursos para satisfacer la sed de conocer y entender las claves del funcionamiento de estas “máquinas”, brindando también la oportunidad de alimentar esa pasión con aplicaciones y ejemplos llamativos y actuales.

Finalmente, el material que aquí se ofrece ha sido elaborado fundamentalmente con fines docentes, pretendiendo ser una contribución a la maduración como ingeniero del alumno y tratando de aprovechar el gran atractivo natural del tema (los MCIA) para consolidar en él los conocimientos básicos de un elevado número de disciplinas diferentes que constituyen el fundamento de la mayoría de las ingenierías.

Francisco Payri González
Catedrático de Universidad
CMT – Motores Térmicos
Universidad Politècnica de Valencia

Valencia, 9 de septiembre de 2013.

Agradecimientos

En primer lugar, los autores queremos expresarnos mutuamente un sincero agradecimiento por la contribución de cada uno a la realización de esta obra, que constituye realmente un trabajo en equipo. Ha sido la iniciativa, el entusiasmo y la constancia de unos y otros los que han hecho nacer, crecer y culminar este “proyecto” que ahora podemos presentar.

En segundo lugar, agradecemos también la contribución, quizás sutil pero eficaz, de todo el equipo de profesores del *Departamento de Máquinas y Motores Térmicos* de la *Universitat Politècnica de València*. Son múltiples las ideas, razonamientos, figuras, esquemas, etc. que hemos podido utilizar gracias al esfuerzo y aportación de todos ellos.

Agradecemos también al equipo directivo del *Departamento de Máquinas y Motores Térmicos* de la *Universitat Politècnica de València* la acogida que han mostrado con respecto a esta iniciativa, así como toda la formación que nos han brindado, pues sin ella este trabajo nunca habría llegado a ser una realidad.

Finalmente queremos igualmente agradecer a muchos de nuestros alumnos el hecho de habernos comunicado, a lo largo de los cinco años de vida que ha tenido la primera versión de este libro, una serie de erratas que han ido encontrando, puesto que eso garantiza ahora una mayor calidad en esta segunda versión.

Los autores

Índice general

1. Parámetros característicos	1
1.1. Cuestiones	1
1.1.1. Concepto de parámetro normalizado	1
1.1.2. Cálculo de parámetros normalizados	2
1.1.3. Comparación de motores muy dispares	4
1.1.4. Comparación de dos combustibles distintos	6
1.1.5. Estimación de la potencia efectiva	7
1.1.6. Estimación de la cilindrada	8
1.1.7. Verificación de datos	9
1.1.8. Comparación de curvas características	9
1.1.9. Motor BMW M3	12
1.2. Problemas	13
1.2.1. Problema 1	13
1.2.2. Problema 2	16
1.2.3. Problema 3	19
1.2.4. Problema 4	21
1.2.5. Problema 5	24
1.2.6. Problema 6	27
1.2.7. Problema 7	30
1.2.8. Problema 8	34
2. El proceso de renovación de la carga	39
2.1. Cuestiones	39
2.1.1. Rendimiento volumétrico muy elevado	39
2.1.2. Fenómenos en colectores para incrementar el rendimiento vo- lumétrico	40
2.1.3. Efecto del AAE en el funcionamiento del motor	41

2.1.4.	Diagrama de distribución	42
2.1.5.	Sistemas de distribución y admisión variable	43
2.1.6.	Sistema de admisión variable “escalonado”	44
2.1.7.	Uso del motor como freno para el vehículo	46
2.2.	Problemas	47
2.2.1.	Sintonizado de un colector de admisión	47
2.2.2.	Adaptación de la longitud de un colector de admisión	48
2.2.3.	Cálculo estimativo de la longitud óptima de un colector de admisión	49
2.2.4.	Rendimiento volumétrico en motor sobrealimentado	51
3.	Sobrealimentación	53
3.1.	Cuestiones	53
3.1.1.	Interés de la sobrealimentación	53
3.1.2.	Sobrealimentación por presión y por temperatura	55
3.1.3.	Objetivo de la sobrealimentación	56
3.1.4.	Sobrealimentación en MEP y MEC	57
3.1.5.	Problemática del acoplamiento del turbocompresor	59
3.1.6.	Acoplamiento de un grupo turbocompresor a un motor estacionario	60
3.1.7.	Diseño descendente de motores	60
3.1.8.	Comparación de los dos tipos de sobrealimentación	61
3.1.9.	El motor TSI de Volkswagen	63
3.2.	Problemas	65
3.2.1.	Acoplamiento de un turbo a un motor de encendido por compresión	65
4.	Arquitectura de motor	71
4.1.	Cuestiones	71
4.1.1.	Partes de la biela	71
4.1.2.	Cabeza de biela desmontable	72
4.1.3.	Mecanizado de la unión biela-sombrerete	73
4.1.4.	Circuito de lubricación en un MCIA	75
4.1.5.	Conductos de agua y aceite en el interior de un MCIA	76
4.1.6.	Diseño del pistón de un MCIA	77

4.1.7.	Sistema de distribución con ataque directo	78
4.1.8.	Regulación automática de la holgura entre elementos del sistema de distribución	78
4.1.9.	Ruido de distribución	80
4.1.10.	Tipos de distribución	81
4.1.11.	Equilibrado del cigüeñal	83
4.1.12.	Motor VR de Volkswagen	83
4.1.13.	Volante bimasa	85
4.2.	Problemas	86
4.2.1.	Estudio de las fuerzas en una biela con pie trapezoidal	86
4.2.2.	Estudio de las pérdidas de masa del cilindro por <i>blow-by</i>	92
5.	Combustión en MEP y MEC	99
5.1.	Cuestiones	100
5.1.1.	Motor de explosión	100
5.1.2.	Límite del régimen de giro	100
5.1.3.	Tiempo de retraso	101
5.1.4.	Relación entre el tiempo de retraso y la combustión premezclada en MEC	102
5.1.5.	Utilidad de la inyección piloto	102
5.1.6.	Control de la mezcla en DI e IDI	103
5.1.7.	Arranque en frío en motores Diesel	105
5.1.8.	Comparación entre motores Diesel IDI y DI	105
5.1.9.	Sistemas de inyección Diesel del futuro	107
5.1.10.	Velocidad de combustión en una deflagración premezclada (combustión en MEP)	109
5.1.11.	Dispersión cíclica	111
5.1.12.	Turbulencia “tumble”	112
5.1.13.	Twin-spark	113
5.1.14.	Encendido superficial	114
5.1.15.	Consecuencias del picado de biela	114
5.1.16.	Condiciones críticas para el picado de biela	116
5.1.17.	Diseño cámara combustión MEP	116
5.1.18.	Centrado de la combustión	118
5.1.19.	Variación del avance del encendido con la carga	118

5.1.20. Parámetros cuantificadores de la calidad del combustible	120
5.2. Problemas	121
5.2.1. Estimación de la masa inyectada a partir de la medida de presión en el cilindro	121
6. Emisiones contaminantes en MCIA	127
6.1. Cuestiones	127
6.1.1. Emisiones típicas en MEP	127
6.1.2. Emisiones típicas en MEC	128
6.1.3. Estrategias de eliminación de contaminantes	130
6.1.4. Homologación. Normativa anticontaminante	131
6.1.5. Automóvil vs. vehículo industrial	132
6.1.6. Reducción de NOx en MEC	133
6.1.7. Trade-off NOx / humos	133
6.1.8. EGR en MEP	135
6.1.9. Emisiones de HC sin quemar	135
6.1.10. Inyección de aire secundario en el escape	136
6.1.11. Emisiones de CO	137
6.1.12. Evolución de las emisiones de un MEP con el dosado	137
6.1.13. Emisiones de NOx en un MEP de inyección directa	139
6.1.14. Emisiones de humos por avería	140
6.1.15. Filtro de partículas en los MEC	141
6.1.16. El cánister –filtro de carbón activo	145
6.1.17. Problemas de contaminación en un MEP	146
6.1.18. Activación del catalizador de 3 vías (<i>light-off</i>)	147
6.1.19. Diagnóstico del motor por los humos de escape	149
6.2. Problemas	150
6.2.1. Verificación de cumplimiento de norma	150
7. Requerimientos de la mezcla en MEP	153
7.1. Cuestiones	153
7.1.1. Dosados característicos	153
7.1.2. Curva de gancho	155
7.1.3. Pérdida de potencia causada por el catalizador	155
7.1.4. Problemas durante el transitorio de aceleración	157

7.1.5.	Problemas durante el transitorio de deceleración	158
7.1.6.	Transitorio de arranque en frío	159
7.1.7.	¿Cuándo son más críticos los problemas en transitorio?	160
7.1.8.	Principio de funcionamiento de los sistemas de inyección electrónicos	161
7.1.9.	Dificultades en la inyección directa de gasolina	162
7.1.10.	Combustibles gaseosos	163
7.1.11.	Motor con etanol	164
7.2.	Problemas	165
7.2.1.	Modificación de las prestaciones de un motor al cambiar de gasolina a etanol	165
8.	Teoría de la semejanza en MCIA	169
8.1.	Cuestiones	169
8.1.1.	¿Qué parámetros son iguales en motores semejantes?	169
8.1.2.	Consecuencias de la subdivisión de la cilindrada	170
8.1.3.	Reglamento de <i>Super-Bikes</i>	171
8.1.4.	Tendencia del par, la potencia y el régimen de giro al variar el tamaño del motor	172
8.1.5.	Motor con problemas térmicos	173
8.1.6.	Mejora de la potencia por unidad de cilindrada	174
8.1.7.	Rendimiento en motores semejantes	174
8.2.	Problemas	175
8.2.1.	Problema 1	175
8.2.2.	Problema 2	177
8.2.3.	Problema 3	178
8.2.4.	Problema 4	181
8.2.5.	Problema 5	183
8.2.6.	Problema 6	185
8.2.7.	Problema 7	187
8.2.8.	Problema 8	189
8.2.9.	Problema 9	191
8.2.10.	Problema 10	193
8.2.11.	Problema 11	195
8.2.12.	Problema 12	197

9. Mejora de prestaciones en MCIA	201
9.1. Cuestiones	201
9.1.1. El dilema potencia / par	201
9.1.2. Elección de curvas características (I)	203
9.1.3. Parámetros que afectan a la potencia efectiva	204
9.1.4. Reducción de la inercia de los elementos móviles	206
9.1.5. Sistema de distribución para motores de elevadas prestaciones .	207
9.1.6. Ángulo de V para un motor de F1	208
9.1.7. Efecto de las curvas características en el comportamiento del vehículo	210
9.1.8. Elección de curvas características (II)	212
9.2. Problemas	213
9.2.1. Comparación de un MEP y un MEC para competición	213
9.2.2. Diseño de base de un motor de F1	218

Tabla de símbolos

Latinos

a	Velocidad del sonido Aceleración
A	Area
B	$S/(2 \cdot L_b) \cdot \text{sen}(\alpha)$ Constante para la estequiometría de la reacción
c	Velocidad
cc	Centímetros cúbicos
c_m	Velocidad Media de Pistón
CO	Monóxido de carbono
c_p	Capacidad calorífica a presión constante
c_v	Capacidad calorífica a volumen constante
C_x	Coefficiente aerodinámico
D	Diámetro
F	Dosado absoluto Fuerza
g	Aceleración de la gravedad
GC	Grado de carga
g_{ef}	Consumo específico de combustible efectivo
h	Entalpía específica (por unidad de masa)
H_c	Poder Calorífico Inferior del combustible
HC	Hidrocarburos sin quemar
i	Número de ciclos por vuelta
L	Longitud
m	Masa
\dot{m}	Caudal másico
M	Par motor Masa molecular
n	Régimen de giro [rps]
N	Potencia
NO _x	Oxidos de nitrógeno
P	Presión
p_{me}	Presión Media Efectiva
p_{mi}	Presión Media Indicada

Q	Calor
\dot{Q}	Potencia calorífica
R	Constante particular del gas
	Radio del cigüeñal ($S/2$) o de manivela
R_c	Relación de compresión (volumétrica)
S	Carrera
t	Tiempo
T	Temperatura
U	Energía interna
V	Volumen
	Cilindrada
vel	Velocidad
w	Peso (para efectuar una media ponderada)
W	Trabajo
x	Átomos de C en la molécula de combustible
y	Posición del pistón
	Átomos de H en la molécula de combustible
\dot{y}	Velocidad del pistón
\ddot{y}	Aceleración del pistón
z	Número de cilindros
	Átomos de O en la molécula de combustible

Griegos

α	Ángulo de cigüeñal
	Ángulo de vaivén de las ondas en un colector
	Posición de la mariposa de carga de un MEP
β	Ángulo de inclinación de la carretera
η	Rendimiento
γ	Coefficiente adiabático del gas
λ	Relación de semejanza geométrica
ρ	Densidad
π_c	Relación de compresión (cociente de presiones)
π_{exp}	Relación de expansión (cociente de presiones)
ω	Velocidad angular

Subíndices y superíndices

a	Aire
adm	Admisión
$aero$	Aerodinámico
$alternativa$	Del conjunto alternativo (pistón, bulón, segmentos y parte de la biela)
arr	En arrastre
atm	Atmosférico
b	Referente a la biela

<i>bb</i>	De <i>blow-by</i>
<i>c</i>	Isentrópico de compresor
<i>cárter</i>	En el cárter
<i>cc</i>	Cámara de Combustión
	Por cilindro y ciclo
<i>cil</i>	Referente al cilindro
<i>cjto</i>	Conjunto (pistón, bulón y segmentos)
<i>comb</i>	En combustión
<i>cr</i>	Crítica
<i>D</i>	Desplazado
<i>e</i>	Efectivo
	Estequiométrico
	Entrada
<i>ebullición</i>	De ebullición
<i>espec</i>	Específica
<i>f</i>	Combustible
<i>g</i>	De gases de escape
	En la garganta
<i>i</i>	Indicada
	Referente al modo i (en ciclo 13 modos)
<i>ideal</i>	Referente al caso ideal
<i>inercia</i>	De inercia
<i>motor</i>	Del motor
<i>opt</i>	Optimo
<i>p</i>	Pistón
<i>presión</i>	De presión
<i>quemada</i>	Referente a los gases quemados
<i>r</i>	Relativo
<i>real</i>	Referente al caso real
<i>red</i>	Reducido
<i>ref</i>	De referencia
<i>refrig</i>	Refrigerante
<i>res</i>	Resistente
<i>s</i>	Isentrópico
<i>t</i>	Isentrópico de turbina
<i>T</i>	Total
<i>turb</i>	Referente a la turbina
<i>vehículo</i>	Del vehículo
<i>vol</i>	Volumétrico

Siglas

2T	Dos tiempos
4T	Cuatro tiempos
AAA	Avance Apertura Admisión
AAE	Avance Apertura Escape
CFR	Motor normalizado para la determinación del número de octano (viene de <i>Cooperative Fuel Research</i>)
dCi	Siglas utilizadas por Renault para designar sus motores Diesel DI con common rail
DI	Inyección directa (<i>Direct Injection</i>)
DFQL	Derivada de la fracción de calor liberado
DPF	Filtro de partículas (<i>Diesel Particulate Filter</i>)
ECU	Unidad de control electrónico (<i>Electronic Control Unit</i>)
F1	Fórmula 1
FQL	Fracción de calor liberado
FSI	Siglas utilizadas por VW para designar la mayoría de modelos con inyección directa de gasolina
GDI	Siglas utilizadas por Mitsubishi para designar los modelos con inyección directa de gasolina
GLP	Gases Licuados de Petróleo (butano)
HDI	Siglas utilizadas por Peugeot-Citroën para designar sus vehículos de inyección directa Diesel
IDI	Inyección indirecta (<i>Indirect Injection</i>)
IPN	Perfil normalizado de una viga en forma de I
MCIA	Motor de Combustión Interna Alternativo
MEC	Motor de Encendido por Compresión
MEP	Motor de Encendido Provocado
MON	Número de octano de motor (<i>Motor Octane Number</i>)
OHC	Arbol de levas en cabeza (<i>Over Head Camshaft</i>)
RCA	Retraso Cierre Admisión
RCE	Retraso Cierre Escape
RON	Número de octano de investigación (<i>Research Octane Number</i>)
TDI	Siglas que utiliza Volkswagen para designar sus motores Diesel de inyección directa turbosobrealimentados
TSI	Siglas del motor Volkswagen con doble sistema de sobrealimentación
V	Válvulas
	Disposición de los cilindros en V
VR	Angulo de V reducido (siglas utilizadas por VW)
VW	Siglas de Volkswagen

Capítulo 1

Parámetros característicos

Contenido

1.1. Cuestiones	1
1.1.1. Concepto de parámetro normalizado	1
1.1.2. Cálculo de parámetros normalizados	2
1.1.3. Comparación de motores muy dispares	4
1.1.4. Comparación de dos combustibles distintos	6
1.1.5. Estimación de la potencia efectiva	7
1.1.6. Estimación de la cilindrada	8
1.1.7. Verificación de datos	9
1.1.8. Comparación de curvas características	9
1.1.9. Motor BMW M3	12
1.2. Problemas	13
1.2.1. Problema 1	13
1.2.2. Problema 2	16
1.2.3. Problema 3	19
1.2.4. Problema 4	21
1.2.5. Problema 5	24
1.2.6. Problema 6	27
1.2.7. Problema 7	30
1.2.8. Problema 8	34

1.1. Cuestiones

1.1.1. Concepto de parámetro normalizado

Los siguientes parámetros: potencia efectiva, par motor y régimen de giro, ¿son directamente comparables entre motores de tamaño diferente? En caso negativo, ¿cuáles son los parámetros correspondientes que sí son comparables? Coméntese la respuesta.

Los tres parámetros especificados dependen en gran medida del tamaño del motor, con lo que no son comparables entre motores de tamaño diferente. El comentario que se puede hacer de cada uno de estos parámetros es el siguiente:

- La potencia crece, de manera natural, con el área total de los pistones. Por esta razón, el parámetro normalizado que permite comparar la potencia del motor es la potencia específica (o potencia por unidad de área de pistones), tal y como se muestra en la siguiente expresión:

$$N_{e_espec} = \frac{N_e}{z \cdot A_p} \quad [kW/m^2] \quad (1.1)$$

- El par motor depende de la cilindrada del motor en cuestión. Para normalizar su valor se debe dividir por ésta, obteniéndose así la presión media efectiva, que se define como el trabajo efectivo efectuado en un ciclo dividido por la cilindrada:

$$pme = \frac{W_e}{V_T} = \frac{W_e \cdot n \cdot i}{V_T \cdot n \cdot i} = \frac{N_e}{V_T \cdot n \cdot i} = \frac{M_e \cdot 2 \cdot \pi \cdot \dot{\phi}}{V_T \cdot \dot{\phi} \cdot i} \quad [Pa] \quad (1.2)$$

Aunque las unidades naturales de este parámetro sean los Pa es mucho más habitual utilizar los bar .

- El régimen de giro depende fuertemente del tamaño del motor: cuanto más grande es el motor, menor es su régimen de giro. El parámetro normalizado de esta magnitud es la velocidad media de pistón, definida de la siguiente manera:

$$c_m = 2 \cdot S \cdot n \quad [m/s] \quad (1.3)$$

Las tres magnitudes normalizadas de las que se ha hablado se relacionan entre sí a través de la siguiente expresión:

$$N_e = pme \cdot V_T \cdot n \cdot i = pme \cdot z \cdot A_p \cdot \frac{2}{2} \cdot S \cdot n \cdot i \quad \Rightarrow \quad \frac{N_e}{z \cdot A_p} = \frac{pme \cdot c_m \cdot i}{2} \quad (1.4)$$

Al tener en la derecha de la expresión solamente magnitudes normalizadas (pme y c_m), además de algunas constantes, lo que se tiene en la izquierda debe ser igualmente un parámetro normalizado, con lo que se demuestra que la potencia específica es el parámetro normalizado de la potencia efectiva.

1.1.2. Cálculo de parámetros normalizados

Se tienen dos motores, A y B, con las características mostradas en la Tabla 1.1.

Calcúlense los principales parámetros normalizados (potencia específica, pme y c_m) de ambos motores para poder compararlos, y coméntese el

		Motor A	Motor B
D	[mm]	90.9	79.5
S	[mm]	88.4	95.5
z	[$-$]	4	4
N_e máx.	[kW]	106	81
n de N_e máx.	[rpm]	5400	4000

Tabla 1.1: Características principales de los motores A y B.

resultado obtenido. A la vista de estos parámetros y de lo que se considere oportuno, ¿qué tipo de motor parece ser que es cada uno de ellos (MEP o MEC, sobrealimentado o atmosférico)? Justifíquese la respuesta.

Los parámetros normalizados que se mencionan se calculan de la siguiente forma:

$$pme = \frac{N_e}{V_T \cdot n \cdot i} \quad c_m = 2 \cdot S \cdot n \quad N_{e_espec} = \frac{N_e}{z \cdot A_p} \quad (1.5)$$

El resultado obtenido se muestra en la Tabla 1.2.

		Motor A	Motor B
N_{e_espec}	[kW/m^2]	4083.46	4079.44
c_m	[m/s]	15.912	12.733
pme	[bar]	10.27	12.82

Tabla 1.2: Resultados principales para cada uno de los motores.

Analizando el régimen de giro máximo y fijándose en la relación carrera diámetro, se puede decir que el motor A será un MEP (régimen elevado y motor ligeramente supercuadrado), mientras que el B es un MEC (régimen bajo y motor alargado). Fijándose en los valores de pme , el motor A será atmosférico y el B sobrealimentado (en un MEC atmosférico los valores típicos de pme están por debajo de 10 bar).

Al observar los parámetros normalizados se constata que ambos motores tienen una potencia específica equivalente. Pero la manera de conseguirla es muy distinta: el motor A (que es MEP) lo consigue gracias a una c_m más elevada, mientras que el motor B (que es un MEC) lo consigue con una pme más grande (por ser sobrealimentado) y una c_m moderada. Esto es una peculiaridad típica de cada uno de estos tipos de motores.

Para seguir leyendo haga click aquí