



TEMAS AVANZADOS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

F. Payri/J.M^a. Desantes

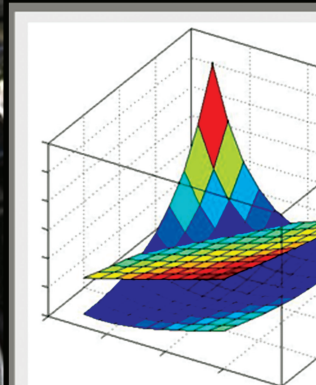
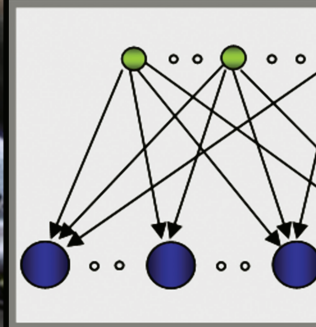
PREDICCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE EMISIONES Y CONSUMO MEDIANTE REDES NEURONALES EN MOTORES DIESEL

CMT
motores térmicos



UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE VALÈNCIA

LEONOR HERNÁNDEZ LÓPEZ



EDITORIAL REVERTÉ

TEMAS AVANZADOS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

F. Payri/J.M^a. Desantes

PREDICCIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE EMISIONES Y CONSUMO MEDIANTE REDES NEURONALES EN MOTORES DIESEL

LEONOR HERNÁNDEZ LÓPEZ

Dr. en Ciencias Físicas

Profesor Ayudante

Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción,
Universitat Jaume I.



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



EDITORIAL REVERTÉ S.A.
www.reverte.com

Directores de la Serie

Francisco Payri González
Dr. Ingeniero Industrial

José María Desantes Fernández
Dr. Ingeniero Industrial

Catedráticos de Universidad
CMT – Motores Térmicos
Universidad Politécnica de Valencia

**Predicción y optimización de emisiones y consumo
mediante redes Neuronales en Motores Diesel**

Copyright © L. Hernández López

Edición en papel:

© Editorial Reverté. S.A., 2010
ISBN: 978-84-291-4708-7

Edición en e-book:

© Editorial Reverté. S.A., 2020
ISBN: 978-84-291-9092-2

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15, Local B

08029 Barcelona

Tel: (34) 93 419 33 36

E-mail: reverte@reverte.com

Internet: <http://www.reverte.com>

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

Prefacio

Las estrictas normativas europeas en cuanto a los límites máximos permitidos de emisiones de gases contaminantes y de partículas, junto con el requerimiento en la reducción del consumo de combustible impuesto por el mercado y el control de las emisiones de CO_2 , someten a los motores Diesel de automoción a unos niveles de exigencia muy elevados. El desarrollo tecnológico llevado a cabo como respuesta a estas demandas en el campo de estos motores, ha supuesto un aumento notable en la complejidad de los mismos, incrementando de forma importante el número de parámetros de diseño y operativos de motor que hay que optimizar. Este hecho complica la predicción de las emisiones, a la que vez que impone al proceso de optimización y calibración del motor unas dimensiones elevadas.

Enmarcados dentro de esta problemática surgieron un conjunto de proyectos de colaboración entre las empresas PSA - Peugeot Citroën y Renault V.I. y la línea de combustión del grupo CMT - Motores Térmicos donde se evaluaron nuevos procedimientos para la predicción y optimización de las emisiones contaminantes y la eficiencia basadas en redes neuronales artificiales (RNA). Estas labores de investigación han dado lugar al trabajo presentado en esta monografía.

El objetivo de este trabajo ha sido desarrollar una metodología para ajustar los factores de diseño y los parámetros de entrenamiento de las redes neuronales artificiales, de manera que proporcionen las mejores predicciones de emisiones y consumo a partir de los parámetros operativos del motor. Posteriormente se han incorporado las herramientas de predicción dentro de unos algoritmos de optimización con el objetivo de obtener los reglajes de motor que minimicen conjuntamente varios parámetros de salida del motor en régimen estacionario.

No quiero concluir sin decir que es una satisfacción para mí presentar esta monografía, que constituye el colofón a varios años de trabajo. Tengo la certeza que, todo el trabajo aquí sintetizado será de utilidad para aquellos a los que va dirigido este libro, tanto investigadores como profesionales que desarrollan su trabajo de I+D en el sector de los motores Diesel de automoción.

José María Desantes Fernández

CMT - Motores Térmicos

Universidad Politécnica de Valencia

Índice General

1	Introducción	1
1.1	Justificación	1
1.2	Sobre esta monografía	5
2	Problemática de las emisiones en motores Diesel	9
2.1	Introducción	9
2.2	Implantación de los motores Diesel	10
2.3	Impacto medioambiental	11
2.4	Normativa europea de control de emisiones para motores Diesel	16
2.4.1	Vehículos ligeros	17
2.4.2	Vehículos pesados	19
2.5	Revolución tecnológica en motores Diesel	22
2.6	Modelado de emisiones en motores Diesel	27
2.6.1	Descripción general de la combustión Diesel	28
2.6.2	Mecanismos de formación de emisiones	32
2.6.2.1	NO _x	33
2.6.2.2	Partículas	35
2.6.2.3	CO	37
2.6.2.4	HC	38
2.6.3	Diferentes aproximaciones al modelado de las emisiones Diesel	39

3	Introducción a las Redes Neuronales Artificiales (RNA)	45
3.1	Introducción	45
3.2	Analogía biológica	46
3.3	Definiciones básicas de RNA	47
3.4	Breve perspectiva histórica	47
3.5	Características principales	49
3.6	Elementos básicos de procesado	51
3.6.1	Sistema de patrones entrada-salida	52
3.6.2	Conexiones y pesos sinápticos	52
3.6.3	Funciones de activación	53
3.6.4	Elemento de procesado: neurona	54
3.6.5	Asociación de neuronas	55
3.7	Arquitecturas de RNA	57
3.7.1	Clasificación según número de capas	58
3.7.2	Clasificación según tipo de conexiones	58
3.7.3	Clasificación según tipo de información	60
3.8	Entrenamiento de RNA	60
3.8.1	Entrenamiento no supervisado	61
3.8.2	Entrenamiento supervisado	62
3.9	Algoritmo Backpropagation	64
3.9.1	Desarrollo matemático del algoritmo	65
3.9.2	Diagrama de flujo del algoritmo	70
3.9.3	Mejora de la convergencia del algoritmo	71
3.9.3.1	Método del gradiente	73
3.9.3.2	Método de Newton	76
3.9.3.3	Método de cuasi-Newton	77
3.9.3.4	Método del gradiente conjugado	77
3.9.4	Consideraciones generales sobre el algoritmo	77
3.9.4.1	Preprocesado de patrones	78

3.9.4.2	Inicialización de los pesos	79
3.9.4.3	Actualización de los pesos	80
3.9.4.4	Condiciones de parada del entrenamiento	81
3.9.4.5	Tamaño de la RNA	81
3.10	Generalización de RNA	82
3.10.1	Importancia de los patrones de entrenamiento	83
3.10.2	Sobrentrenamiento	84
3.10.2.1	Disminución de los pesos a ajustar	85
3.10.2.2	Parada anticipada	85
3.10.2.3	Validación cruzada	86
3.10.2.4	Regularización de la función de coste	87
3.10.2.5	Incorporación de ruido a los datos	88
3.11	Resumen	88
4	Instalaciones y medidas experimentales	91
4.1	Introducción	91
4.2	Motores Diesel	93
4.2.1	Motor monocilíndrico HD	94
4.2.2	Motor policilíndrico LD	96
4.3	Variables experimentales controlables	98
4.3.1	Salidas de las RNA	100
4.3.2	Entradas a las RNA	101
4.4	Variables no controlables. Ruido experimental	105
4.4.1	Precisión de los equipos de medida	105
4.4.1.1	Equipos de medida en motor	106
4.4.1.2	Equipos de medida de emisiones	108
4.4.2	Metodología de ensayo	111
4.4.3	Postprocesado de datos	113
4.4.4	Repetitividad de medidas	116

4.5	Definición de patrones de entrenamiento	124
4.5.1	Plan de ensayo para el motor monocilíndrico HD	125
4.5.2	Plan de ensayo para el motor policilíndrico LD	129
4.5.3	Comparación de planes de ensayo HD-LD	135
5	Desarrollo de RNA para la predicción de parámetros de motor	141
5.1	Introducción	141
5.2	Medida de calidad de predicción de las RNA	142
5.3	Estrategia de entrenamiento	144
5.4	RNA iniciales y predicciones preliminares para el motor LD	149
5.5	Algoritmo de entrenamiento	162
5.5.1	Variación de algoritmos	162
5.5.2	Método de Levenberg-Marquardt	164
5.5.2.1	Actualización de los pesos	165
5.5.2.2	Parámetros de entrenamiento	167
5.5.2.3	Regularización de la función de coste	168
5.6	Variación de arquitectura	170
5.6.1	Neuronas de una capa oculta	170
5.6.2	Capas ocultas	173
5.7	Parámetros alternativos de entrada a las RNA	174
5.8	Variación de preprocesado de patrones	178
5.9	Evolución de la calidad de las RNA	183
5.10	RNA optimizadas para el motor LD	184
5.11	RNA para el motor HD	187
5.11.1	Variación de neuronas de la capa oculta	195
5.11.2	Variación de entradas a RNA	197
5.11.3	Predicciones de RNA optimizadas	198
5.12	Comparación de predicciones de RNA de LD y HD	205
5.13	Importancia relativa de los parámetros de entrada a las RNA	208

6 Optimización de prestaciones de motor	215
6.1 Introducción	215
6.2 Planteamiento general de la optimización	217
6.3 Optimización de prestaciones en motor LD	220
6.3.1 Herramienta de predicción	224
6.3.2 Función objetivo	225
6.3.3 Métodos de optimización	232
6.3.4 Resultados de la optimización	239
6.3.4.1 Resultados con AG	240
6.3.4.2 Resultados con SQP	257
6.4 Optimización de prestaciones en motor HD	261
6.4.1 Elementos de la optimización	263
6.4.2 Resultados de la optimización	265
7 Reflexiones finales	273
A Ajuste de la FO de optimización	281
Bibliografía	285

Tabla de símbolos

Latinos

A	Coefficiente de la función objetivo
$A_{10\%}$	Porcentaje de predicciones por debajo de 10% de error relativo
$A_{5\%}$	Porcentaje de predicciones por debajo de 5% de error relativo
a	Salida de una neurona
b	Sesgo o bias de la RNA
D	Exponente de la FO de deseabilidad
Dt	Diámetro de tobera [m]
DUR	Duración de la inyección [s]
E	Coefficiente de la FO exponencial
E_A	Energía de activación [J/mol]
E_T	Función de coste
F	Dosado [-]
F	Factor de corrección para BSFC
F/A	Dosado absoluto [-]
F_{eff}	Dosado efectivo [-]
F_r	Dosado relativo [-]
f	Función de activación de una neurona
G_{ex}	Caudal másico de los gases de escape [kg/h]
g	Factor de regularización de la función de coste
gen	Generación del AG
H	Matriz del Hessiano
Ha	Humedad absoluta [-]
I	Matriz identidad
$Inic$	Inicialización
ind	Individuo del AG
J	Matriz jacobiana

K_{HD}	Factor de corrección de condiciones ambientales para NO_x [-]
K_w	Factor de corrección de humedad para emisiones [-]
L	Subgrupo de patrones de entrenamiento
LIM	Límite
M, m	Masa [kg]
$MAXGEN$	Generación máxima del AG
MU	Factor de regularización
m	Número de patrones de entrenamiento
m	Modo del ciclo ESC
N	Neurona de la RNA
N_e	Potencia [W]
n	Régimen de giro [rpm]
P	Presión [Pa]
P_s	Presión atmosférica seca [Pa]
p	Patrón de entrada
Q	Número de neuronas de una capa oculta
Q	Factor de calidad de las predicciones
R	Constante de los gases ideales [$J/molK$]
R	Radicales de hidrocarburos
R	Número de entradas a la RNA
R	Coefficiente de correlación
S	Número de salidas de la RNA
T	Temperatura [K]
t	Tiempo [s]
V	Número total de pesos de la RNA
w	Peso de la RNA
XO_2	Fracción molar de oxígeno [-]
y	Patrón de salida

Griegos

α	Momentum
Δ	Incremento
δ	Parámetro de retropropagación
γ	Parámetro de la función de activación sigmoide
μ	Factor de regularización
ρ	Factor de aprendizaje
σ	Desviación estándar

Subíndices y superíndices

<i>a</i>	Aire
<i>abs</i>	Absoluto
<i>adm</i>	Admisión
<i>atm</i>	Condiciones atmosféricas
<i>dec</i>	Decrecimiento
<i>entr</i>	Entrenamiento
<i>est</i>	Estequiométrico
<i>ex</i>	Escape
<i>f</i>	Combustible
<i>form</i>	Formación
<i>hollin</i>	Hollín (dry soot)
<i>i</i>	Índice referente a una neurona
<i>in</i>	Inicial
<i>inc</i>	Incremento
<i>inter</i>	Salida intercooler
<i>iter</i>	Iteración
<i>j</i>	Índice referente a una neurona
<i>k</i>	Índice referente a una capa oculta de la RNA
<i>max</i>	Máximo
<i>oil</i>	Aceite
<i>oxid</i>	Oxidación
<i>pi</i>	Piloto
<i>pr</i>	Principal
<i>reg</i>	Regularizado
<i>rel</i>	Relativo
<i>u</i>	Índice referente a la capa de salida de la RNA
<i>w</i>	Agua

Siglas

AG	Algoritmos genéticos
BFGS	Algoritmo cuasi-Newton Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno
BP	Presión de admisión (<i>Boosting Pressure</i>)
BSFC	Consumo específico de combustible
BTDC	Antes del punto muerto superior (<i>Before Top Dead Center</i>)
CAD	Ángulo de giro de cigüeñal (<i>Crank Angle Degree</i>)

CFC	Cloro Fluoro Carbono
CFD	Código de cálculo de Mecánica de Fluidos
CLA	Analizador de quimioluminiscencia
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CoefVar	Coefficiente de variación
DI	Inyección Directa (<i>Direct Injection</i>)
DII	Después del Inicio de la Inyección
DoE	Diseño de experimentos (<i>Design Of Experiments</i>)
dFQL	Derivada de la fracción de calor liberado
ECU	Unidad de Control Electrónica (<i>Electronic Control Unit</i>)
EGR	Gases de escape recirculados (<i>Exhaust Gas Recirculation</i>)
ELR	Test europeo de respuesta de carga (<i>European Load Response</i>)
EOI	Final de la inyección (<i>End Of Injection</i>)
EPA	Agencia de Protección Medioambiental Estadounidense
ESC	Ciclo estacionario europeo (<i>European Stationary Cycle</i>)
ETC	Ciclo transitorio europeo (<i>European Transient Cycle</i>)
EUDC	Ciclo extraurbano (<i>Extra Urban Driving Cycle</i>)
FO	Función objetivo
FP	Factor de ponderación
FSN	Filter Smoke Number
FQL	Fracción de calor liberado
FR	Algoritmo de gradiente conjugado de Fletcher-Reeves
GDX	Gradiente con tasa de aprendizaje variable y momentum
HC	Hidrocarburos sin quemar
HD	Vehículo pesado (<i>Heavy Duty</i>)
HFID	Detector de ionización de llama caliente
IDI	Inyección indirecta (<i>Indirect Diesel Injection</i>)
IP	Presión de inyección (<i>Injection Pressure</i>)
ISF	Fracción insoluble (<i>Insoluble Fraction</i>)
LD	Vehículo ligero (<i>Light Duty</i>)
LM	Algoritmo tipo Newton de Levenberg-Marquardt
NO _x	Óxidos de nitrógeno
O ₂	Oxígeno
OBD	Sistema de diagnóstico a bordo (<i>On Board Diagnosis</i>)
OMS	Organización Mundial de la Salud
PAH	Hidrocarburos poliaromáticos (<i>Poly-Aromatic Hydrocarbons</i>)
PC	Plena carga

PLIF	Fluorescencia planar inducida por láser
<i>PM</i>	Partículas (<i>Particulate Matter</i>)
PMS	Punto Muerto Superior
PO	Parámetros Operativos
PR	Algoritmo de gradiente conjugado de Polak-Ribiere
ppm	Partes Por Millón
MCIA	Motor de Combustión Interna Alternativo
MEC	Motor de Encendido por Compresión
MEP	Motor de Encendido Provocado
MSE	Error cuadrático medio (<i>Mean Square Error</i>)
NDIR	Analizador no dispersivo de radiación infrarroja
RNA	Redes Neuronales Artificiales
rpm	Revoluciones Por Minuto
SCR	Catalizadores de reducción selectivos
SEC	Algoritmo tipo cuasi-Newton de la secante
SO_x	Óxidos de azufre
SOC	Comienzo de la combustión (<i>Start Of Combustion</i>)
SOF	Fracción orgánica soluble (<i>Soluble Organic Fraction</i>)
SOI	Comienzo de la inyección (<i>Start Of Injection</i>)
SQP	Programación cuadrática secuencial
TGV	Turbina de Geometría Variable
UDC	Ciclo urbano (<i>Urban Driving Cycle</i>)

Capítulo 1

Introducción

1.1 Justificación

Durante las últimas décadas, la expansión industrial y económica de los países desarrollados ha estado ligada a un incremento importante en la fabricación de vehículos y en el volumen del transporte. Este hecho ha provocado un crecimiento considerable del consumo de los recursos naturales y un notable impacto medioambiental. Las emisiones a la atmósfera de CO_2 , partículas (PM), NO_x , CO , HC , SO_2 , etc, están ocasionando serios problemas a nivel mundial como el calentamiento de la Tierra, el efecto invernadero, la lluvia ácida o el deterioro en la calidad del aire.

Paralelamente a estos problemas ha ido surgiendo una conciencia global sobre la importancia de dichas repercusiones medioambientales, que ha llevado a la aparición de un conjunto de legislaciones encaminadas a controlar las emisiones contaminantes. En el caso de los motores de combustión interna alternativos (MCIA) empleados en automoción, la legislación se ha centrado en la reducción de las emisiones de los gases de escape.

Dentro de los MCIA, las dos alternativas básicas son los motores Diesel (MEC) y los de gasolina (MEP). Los motores Diesel presentan una mayor eficiencia frente a los de gasolina, lo que conlleva ventajas medioambientales debido a la disminución del CO_2 emitido y además ventajas de cara al mercado

por su menor consumo. Estas características han favorecido que este tipo de motores haya ido ganando terreno a los de gasolina.

Aunque los motores Diesel emiten menos CO_2 , todavía tienen una asignatura pendiente con otro tipo de emisiones de escape, tema que ya está resuelto para los motores de gasolina. Los contaminantes principales que emiten los Diesel son fundamentalmente PM y NO_x , aunque en determinadas condiciones de operación también son importantes CO y HC . Estos cuatro compuestos son los que están regulados por las normativas de emisiones. Aunque las principales legislaciones (europea, estadounidense, japonesa, etc) establecen pruebas de certificación diferentes, todas han seguido una evolución similar en cuanto a la reducción de las emisiones permitidas. En la figura 1.1, se muestra la evolución en la reducción de los límites máximos de NO_x y PM permitidos para motores Diesel pesados (HD) en la Comunidad Europea.

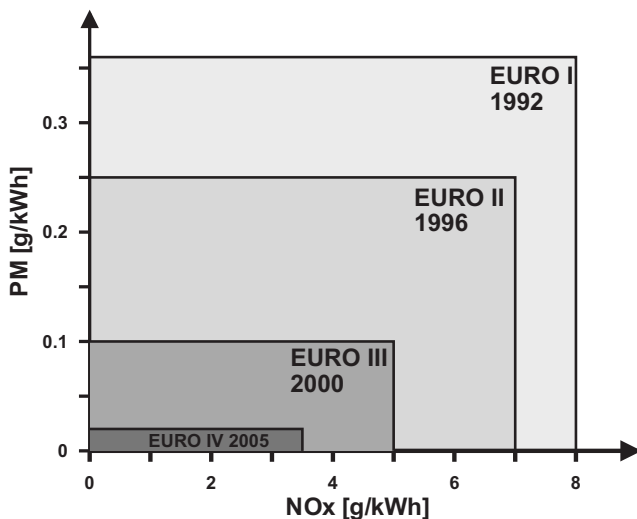


Figura 1.1: Reducción de los límites máximos permitidos para NO_x y PM por la normativa europea para vehículos Diesel pesados HD.

La industria de los motores Diesel ha sufrido una importante revolución tecnológica durante las últimas décadas, tratando de conseguir tanto los límites de emisiones cada vez más restrictivos impuestos por las normativas, como las demandas del mercado de vehículos más rápidos, silenciosos e igualmente eficaces. Con este objetivo, el desarrollo de los vehículos Diesel ha ido incorporando un gran número de nuevas tecnologías, como la recirculación de los gases de escape, sistemas de sobrealimentación más eficaces, nuevos

sistemas de inyección, control electrónico, inyecciones múltiples, sistemas de postratamiento de gases de escape, etc.

En contrapartida, la implantación de nuevas estrategias complica las tareas de diseño y puesta a punto de los motores. El modelado supone un importante ahorro temporal y económico frente a la evaluación experimental propiamente dicha, con lo que se convierte en una herramienta muy valiosa para facilitar el desarrollo de los motores. Con el paso del tiempo, la evolución del modelado en motores ha permitido abordar además de la eficiencia del motor, temas tan complejos como la predicción de emisiones contaminantes.

Existen principalmente dos filosofías a la hora de abordar el problema del modelado de las emisiones:

1. **Modelado físico-químico.** Estos modelos tratan de simplificar la complejidad de la combustión Diesel estimando datos como la composición química o el estado termodinámico de la mezcla, con el objetivo de evaluar las variables dominantes en la formación de las emisiones. Una clasificación dentro de esta aproximación divide los modelos, de menor a mayor complejidad, en cero-dimensionales, fenomenológicos y CFD. A la vez que los modelos van aumentando su complejidad para ajustarse a las características heterogéneas de los mecanismos de formación de las emisiones, requieren datos locales desconocidos o de difícil aproximación e imponen tiempos de cálculo más largos, con lo que no se ha encontrado a día de hoy una solución general y completamente aceptada.
2. **Modelado empírico.** Este tipo de modelos se basa en el uso de regresiones estadísticas a partir de datos experimentales. Pueden clasificarse en modelos de interpolación de cartografías, regresiones configuradas por el usuario o modelos de redes neuronales artificiales (RNA). Estos últimos son autoconfigurables y procuran predicciones razonables para comportamientos no lineales y además en un tiempo de cálculo reducido.

Existen pues varias vías para abordar el problema de la predicción de emisiones, cada una con sus ventajas e inconvenientes, con lo que las características, problemáticas y requerimientos de cada aplicación determinará cuál de ellas es específicamente más conveniente. Algunos de los requerimientos del modelado asociados al desarrollo actual de motores, limitan el uso de modelos de predicción a aquellos que presentan un reducido tiempo de cálculo, tal y como se muestra a continuación.

Por una parte, la mayor flexibilidad en la selección de los reglajes y parámetros de operación de los motores para poder cumplir con las restricciones (emisiones, consumo, etc), conlleva un aumento de los grados de libertad para cada punto de funcionamiento, con lo que las posibles configuraciones aumentan considerablemente. Un requerimiento importante por parte de la industria automovilística es el de acortar los tiempos de definición de los reglajes del motor, lo que implica el uso de modelos de predicción y métodos de optimización con tiempos de respuesta limitados.

Por otra parte, la implantación obligatoria de los sistemas OBD (*On Board Diagnosis*) en la legislación europea a partir de 2005 [4], obliga a una serie de mejoras tecnológicas. En la actualidad el vehículo se somete a las pruebas de certificación al salir de fábrica y el usuario debe repetir unas pruebas de mantenimiento periódicamente. Los sistemas OBD están pensados para detectar rápidamente fallos en los componentes y sistemas del vehículo que afecten a los niveles de emisiones, asegurando así el correcto funcionamiento de los vehículos en circulación. Dentro del sistema OBD que se ocupa de limitar las emisiones sería de gran ayuda, en caso de detectar algún fallo, disponer de modelos de predicción de emisiones y poder desarrollar estrategias para devolver las emisiones a los límites establecidos actuando sobre los reglajes del motor. El proceso debería realizarse rápidamente, con lo que la predicción y la optimización quedarían restringidas a aquellas herramientas con un tiempo de respuesta corto.

La naturaleza intrínseca de la formación de emisiones en motores Diesel, dominada por procesos complejos y heterogéneos y controlada por las condiciones locales dentro de la cámara de combustión, obliga a complicar los modelos físico-químicos de cero-dimensionales a CFD. Este hecho supone por una parte la mejora de las predicciones, pero a costa del uso de datos locales de difícil aproximación e impone a su vez tiempos de cálculo más largos.

Por el contrario, las simulaciones empíricas evitan las complejidades de los modelos anteriores, manteniendo una velocidad de cálculo rápida y por lo tanto presentándose como una alternativa interesante para cumplir con los requisitos formulados anteriormente. Dentro de estos modelos, las RNA presentan una serie de ventajas adicionales frente a las demás simulaciones empíricas, tal y como se presentará en capítulos posteriores.

El trabajo que aquí se presenta se enmarca dentro de este escenario, y constituye un desarrollo de las herramientas de RNA para la predicción de

las emisiones y el consumo en motores Diesel, a partir de las condiciones de funcionamiento de motor.

Las herramientas de predicción se tomarán como punto de partida para la optimización de los reglajes, donde el objetivo principal será obtener para cada punto de funcionamiento, las condiciones de menor consumo manteniendo las emisiones por debajo de ciertos límites máximos. De esta manera se podrá contribuir a la complicada tarea de una optimización conjunta, que supone combinar un alto número de parámetros operativos de motor, que además suelen tener efectos contrarios sobre las diversas prestaciones.

1.2 Sobre esta monografía

En la sección anterior se ha presentado de forma sucinta la problemática de los motores Diesel en cuanto a las restricciones, tanto por la legislación de control de emisiones como de mercado, a la que están sometidos estos motores.

Sobre la base de las diversas soluciones propuestas para abordar el problema de predicción de emisiones y la justificación de aproximar el problema mediante RNA, se plantean varios objetivos:

Un primer objetivo es el desarrollo y la aplicación de nuevas herramientas matemáticas al campo de la investigación en motores Diesel, especialmente orientado hacia la predicción de emisiones contaminantes (PM , NO_x , CO y HC), aunque dando cabida también a otros parámetros de salida de motor que serán relevantes a la hora de hacer optimizaciones, como el consumo específico de combustible ($BSFC$) y la temperatura de escape (Tex). Es importante evaluar el grado de precisión de las predicciones obtenidas con RNA para cada parámetro de salida de motor, así como determinar los factores que más afectan a la calidad de las predicciones. Este análisis permitirá establecer tanto la problemática intrínseca de estos modelos como las limitaciones del uso de este tipo de herramienta.

Una vez desarrollado y validado un modelo de predicción con RNA, un segundo objetivo es poder extraer información física de dichas predicciones, obteniendo una mejor comprensión de la relevancia de cada uno de los parámetros de entrada sobre los datos predichos.

Como tercer objetivo se plantea poder integrar las predicciones de RNA en un proceso de optimización. Esta implementación permite a priori una

orientación a la hora de combinar los múltiples parámetros operativos para conseguir una disminución conjunta de emisiones y consumo, reduciendo notablemente la fase experimental de desarrollo de un motor y permitiendo alcanzar más fácilmente los límites marcados por la legislación.

Extender el procedimiento de predicción con RNA y de optimización tanto a un motor ligero (Light Duty) como a un motor pesado (Heavy Duty). La comparación de los resultados obtenidos para cada uno de los dos motores permitirá evaluar las diferentes ventajas y problemas en cada caso.

Para seguir con el desarrollo de la monografía, en el capítulo 2, se expone una justificación más detallada del planteamiento del trabajo, cubriendo las ventajas de los motores Diesel, su implantación en el mercado y un análisis de los inconvenientes de las emisiones Diesel junto con las restricciones para los diferentes vehículos en la normativa europea. Se realiza una descripción del proceso de combustión Diesel y los diferentes mecanismos químicos de formación de las emisiones. Parte de estos factores justificarán la elección de las RNA a la hora de abordar el problema del modelado y la optimización en motores Diesel.

Una vez seleccionado el camino a seguir, se profundiza a lo largo del capítulo 3 en la herramienta matemática que se va a emplear, explicando principios de funcionamiento, ventajas, inconvenientes, diferentes factores de diseño que se pueden ajustar para optimizar las predicciones, mejoras que se pueden implementar en el entrenamiento para favorecer la generalización de las RNA, etc.

Puesto que el modelo elegido es de naturaleza empírica, un aspecto importante del trabajo es la descripción de los ensayos experimentales. La fiabilidad de las variables a emplear como datos de entrada y de salida de las RNA viene impuesta a priori por la instrumentación y los equipos empleados. La definición de los planes de ensayo realizados en cada motor (LD y HD) determina el campo de aplicación de los modelos de predicción obtenidos. Todas estas cuestiones son tratadas a lo largo del capítulo 4.

Una vez obtenidos los datos experimentales, en el capítulo 5 se desarrolla la metodología a seguir para ajustar las herramientas de RNA al problema de predicción de emisiones en motor: elección de tipo de entrenamiento, de arquitectura, de datos de entrada, etc. Se presenta el tipo de resultado junto con la calidad de predicción obtenida para cada parámetro a predecir y para cada motor. La contribución más importante de este capítulo es por lo tanto la generación de las herramientas predictivas.

A lo largo del capítulo 6 se incorporan las herramientas de predicción desarrolladas en el capítulo anterior dentro de algoritmos de optimización con el objetivo de obtener reglajes de motor que minimicen conjuntamente varios parámetros de salida de motor. Se analizan los resultados obtenidos para dos métodos de optimización diferentes, uno clásico y otro heurístico, y se validan experimentalmente algunos resultados optimizados, comparando con datos experimentales obtenidos del motor.

Para terminar, se realiza un resumen final del trabajo realizado y se exponen las conclusiones fundamentales a las que se ha llegado durante la elaboración del documento. También se plantean vías por las que continuar el trabajo, para enfocar el conjunto de posibles desarrollos futuros. Todo esto constituye el capítulo 7.

Capítulo 2

Problemática de las emisiones en motores Diesel

2.1 Introducción

Se cubrirá a lo largo de la primera parte de este capítulo, la evolución de los motores Diesel en el mercado y los efectos negativos sobre el medio ambiente que su expansión ha causado. Se expondrán las limitaciones en emisiones de escape establecidas por la normativa europea con el objetivo de paliar el impacto causado y la consecuente revolución tecnológica que el propio mercado y dichas restricciones han impuesto en estos motores.

La implantación de las nuevas tecnologías ha requerido una rápida evolución en paralelo con el conocimiento y el modelado aplicado a los motores de combustión interna alternativos, con el objetivo de apoyar y orientar en las tareas de desarrollo en este campo. Por lo tanto, la segunda parte del capítulo se centrará en la descripción de los modelos empleados para la predicción de emisiones en este tipo de motores. Para poder tener una visión más general del problema se comenzará con una descripción conceptual y actualizada del proceso de combustión Diesel para pasar a detallar a continuación los diferentes mecanismos químicos que dominan la formación de las emisiones de escape en estos motores.

Esta sección enmarcará la problemática ligada a la predicción de emisiones y servirá de base para introducir en una tercera parte los diferentes modelados con los que se ha tratado de abordar el problema. Además, se analizará más en detalle y se presentarán las ventajas de las redes neuronales artificiales (RNA) frente a las demás soluciones para este tipo de aplicación.

2.2 Implantación de los motores Diesel

Rudolf Diesel patentó en 1892 un motor alternativo de encendido por compresión (MEC). La sustitución del combustible de polvo de carbón por productos derivados del petróleo líquido, junto con algunos cambios mecánicos en el diseño original, supuso la puesta a punto de un motor prototipo en el año 1895. Hoy en día tanto el motor como el tipo de combustible llevan su nombre [8].

Uno de los aspectos que ha favorecido la expansión de los motores Diesel es su eficiencia térmica ¹. Mientras que los motores Diesel presentaban valores máximos de eficiencia del 48% en el año 2000, los motores de gasolina solo alcanzaban valores del 35% [34].

Además de su economía y su durabilidad, otras ventajas de los motores Diesel son su fiabilidad, su seguridad y su posibilidad de implantación en un amplio rango de aplicaciones. Las desventajas de este tipo de motor son que no se ha encontrado todavía la solución definitiva a los problemas de las emisiones (principalmente óxidos de nitrógeno y partículas), que producen más ruido debido a los mayores gradientes de presión dentro de la cámara de combustión y que son más pesados, ya que se refuerza su estructura para que pueda soportar los altos picos de presión de combustión alcanzados.

En conclusión, los motores Diesel juegan un papel importante en la economía, ya que por una parte son responsables del 99% del transporte de mercancías actual [109] debido a sus diversas aplicaciones en locomotoras, barcos, autobuses, camiones, vehículos agrícolas y vehículos pesados (HD) y por otra parte también están presentes en las áreas de generación de energía eléctrica, plantas industriales, minería y construcción. Asimismo, desde las crisis del petróleo de los años 70, el mercado de motores Diesel aplicado a vehículos

¹Se define como la relación entre el trabajo realizado y la energía suministrada por el combustible.

de pasajeros y camiones ligeros aumentó de manera importante, especialmente en Europa, donde además de un menor consumo de combustible implícito de estos motores, se ha seguido una política de reducción de impuestos en el gasóleo.

La gran expansión del transporte en las últimas décadas ha implicado un conjunto de ventajas para la sociedad, pero ha supuesto no obstante una grave agresión al medio ambiente. Es importante detectar y analizar los causantes de este impacto ambiental, para poder limitarlos en las nuevas generaciones de motores.

2.3 Impacto medioambiental

Una definición comúnmente aceptada para el concepto de contaminante es la siguiente: “Se denomina contaminante a toda aquella sustancia natural o artificial que introducida en concentración suficiente en el medio ambiente puede producir un efecto medible sobre los seres humanos, animales, vegetación o materiales de construcción” [8]. Algunos contaminantes son primarios (como CO), ya que son emitidos por fuentes identificables, otros (como el ozono) son secundarios, ya que son formados a partir de reacciones químicas en la atmósfera, mientras que otros (como las partículas) son de origen mixto.

La contaminación atmosférica ha supuesto una justificada preocupación a nivel global, tanto por sus efectos más locales (calidad del aire, lluvia ácida, efectos nocivos para la salud humana), como por sus consecuencias globales (efecto invernadero, destrucción de la capa de ozono).

A continuación se realiza una breve descripción de algunos de los fenómenos a los que contribuyen las emisiones producidas por los motores Diesel:

- **Cambio climático.** “Se denomina cambio climático a las fluctuaciones dentro de una larga escala temporal de temperaturas, precipitaciones, viento y otros elementos del clima del planeta” [40]. Este efecto está producido por un aumento en la concentración de gases atmosféricos que afectan a la absorción de la energía de radiación terrestre. Esta retención de energía durante un determinado tiempo, ocurre de manera natural, y provoca un aumento de $33^{\circ}C$ sobre la temperatura de $-15^{\circ}C$ a la que estaría en promedio la Tierra sin los gases de efecto invernadero [40]. Diversas actividades humanas han ido produciendo un aumento

de las concentraciones de estos gases desde la revolución industrial. Los compuestos a los que se debe el efecto invernadero a nivel estratosférico son CO_2 , metano, N_2O , o compuestos halogenados que contienen flúor, cloro o bromo (como CFC, HCFC, etc). A nivel troposférico también hay determinados compuestos que modifican el balance radiativo terrestre como CO , NO_2 , SO_2 y O_3 [40].

- **Smog fotoquímico.** Es un tipo de polución del aire a nivel troposférico en las áreas metropolitanas, en forma de neblina y con elementos oxidantes como el ozono. La troposfera comprende la capa atmosférica más próxima a la superficie terrestre, hasta una altura entre 12 y 15 Km. A estos niveles, el ozono se forma por la interacción de compuestos orgánicos volátiles y de NO_x con la radiación solar ultravioleta. “El ozono daña tejidos pulmonares, reduce la función pulmonar y expone al pulmón a otros elementos irritantes. Es responsable cada año de pérdidas de cosechas por valor de varios billones de dólares en USA y causa daños notables en las hojas de muchas cosechas y especies de árboles” [37].
- **Lluvia ácida.** Se denomina lluvia ácida a todo tipo de precipitación (lluvia, nieve o niebla) cuyo pH esté por debajo de 5, que es el nivel natural. Ciertos compuestos, como SO_2 y NO_2 , reaccionan con el vapor de agua de la atmósfera produciendo ácido sulfúrico y ácido nítrico, que son responsables de la acidificación de las precipitaciones. Los efectos de la lluvia ácida se extienden tanto a la salud humana (causando trastornos en las vías respiratorias), las construcciones (acelerando el deterioro de los edificios) como a la flora y fauna.
- **Disminución de la capa de ozono.** Por encima de la estratosfera se sitúa una fina capa de ozono. A estos niveles, el ozono absorbe la mayor parte de la radiación ultravioleta del sol, evitando que esta radiación de alto contenido energético (relacionada por ejemplo con cánceres de piel) alcance el nivel troposférico. Si las emisiones de N_2O no son disueltas por el agua, alcanzan la estratosfera y contribuyen a la reducción de la capa de ozono.

Los efectos de la contaminación ambiental se han hecho más notables según han ido aumentando sus fuentes de origen: procesos industriales, centrales de producción de energía, calefacción y transporte basado en combustibles fósiles.